

Georges Lemaître : repères biographiques

DOMINIQUE LAMBERT

Espin

Département Sciences - Philosophies – Sociétés

Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix

61, rue de Bruxelles - B-5000 Namur

dominique.lambert@fundp.ac.be

Dans les pages qui vont suivre, nous proposons une réédition des textes publiés par Georges Lemaître dans la *Revue des Questions Scientifiques*. Ces articles permettent de suivre chronologiquement les intérêts scientifiques du cosmologiste de Louvain, en admirant au passage ses capacités de vulgarisateur. Pour resituer les textes dans leur contexte, il nous a semblé utile de les faire précéder par une courte biographie de celui qui fut l'un des très grands scientifiques du vingtième siècle, qui avait su gagner l'amitié d'Einstein, et qui était aussi un prêtre profondément attaché à sa foi, apprécié des papes de Pie XI à Paul VI. Lemaître est, sans nul doute, l'un des pionniers de la cosmologie physique contemporaine et l'un des précurseurs de la théorie du *Big Bang*, même s'il n'employa jamais ce terme, celui-ci ayant été forgé par Fred Hoyle pour désigner ironiquement l'hypothèse de l'atome primitif. Mais il serait injuste de restreindre ses contributions scientifiques au seul domaine de la cosmologie. Comme certains textes reproduits ici le montreront, ses travaux physiques et mathématiques dépassent largement les contours de la relativité générale. On lui doit d'importants apports au calcul numérique, à l'étude des aurores boréales et australes (résolution du *problème de Störmer* consistant à étudier les trajectoires des particules chargées dans le champ magnétique de la Terre), à la mécanique classique (régularisation des chocs doubles dans le problème des trois corps), à la pédagogie du calcul élémentaire ou encore à l'approfondissement des travaux algébriques d'Eddington (théorie des spi-

neurs). Ceci montre que Lemaître était un mathématicien et un physicien théoricien de haut vol. Plus proche du style de Poincaré que de celui du groupe Bourbaki, Lemaître, avec sa passion pour les ordinateurs, pour le calcul numérique ou pour « l'expérience mathématique », faisait, dans les milieux mathématiques francophones de la fin des années cinquante, figure de marginal. À notre époque, où la puissance de calcul des ordinateurs a donné toute son importance aux simulations numériques et où les mathématiques appliquées ont retrouvé une place de choix, Lemaître nous apparaît comme un scientifique en avance de dix ou vingt années sur son temps, et dont la fécondité des intuitions nous est de plus en plus manifeste.

Longtemps, Lemaître a fait l'objet d'une éclipse injuste. La littérature n'y faisait pas ou peu référence. Aujourd'hui, on découvre que la loi de Hubble mériterait amplement le nom de « Hubble-Lemaître », et l'on reconnaît sans difficulté que le modèle dit de « Tolman-Bondi » (modèle d'univers inhomogène) est en fait, d'abord et avant tout, le modèle découvert par Lemaître... C'est pourquoi il est opportun, à un moment où la communauté internationale a décidé de baptiser du nom de Lemaître le cinquième ravitailleur, ATV (*Automated Transfer Vehicle*), de la station spatiale internationale¹, de reprendre contact avec l'œuvre du célèbre professeur de Louvain et de lui redonner toute la place qu'il mérite, y compris dans les notices historiques des cours de physique et d'astronomie. Le présent dossier voudrait y contribuer en fournissant au lecteur les outils biographiques et bibliographiques indispensables pour entrer dans l'univers de cet étonnant chanoine qui « inventa » le *Big Bang*!²

Une Jeunesse Studieuse

C'est en Belgique, à Charleroi, que naquit Georges Lemaître le 17 juillet 1894. Il fit, dans cette ville, ses Humanités gréco-latines au Collège du Sacré-Cœur tenu par les Jésuites. C'est dans ce collège, vers 16 ans, qu'il ressent,

-
1. Nous renvoyons ici au site de la *European Space Agency (ESA)* : <http://www.esa.int> ; le quatrième ravitailleur, ATV, dont le lancement est prévu pour le début de l'année 2013, portera le nom d'Albert Einstein.
 2. Le lecteur pourra approfondir la lecture de cet article en parcourant la courte annexe mathématique de notre publication : « Georges Lemaître : un survol de son œuvre », *Physicalia Magazine*, 23 (2001) 217-235. Le texte présenté ici actualise et corrige ce « survol ».

suivant ses propres dires, un double appel : celui de la recherche scientifique d'une part et celui de la vocation sacerdotale, d'autre part. La famille de Georges Lemaître ayant du partir à Bruxelles suite à l'incendie accidentel de la verrerie dont son père était propriétaire, le jeune Lemaître retrouve les Jésuites, au Collège Saint-Michel, pour une année spéciale de mathématiques préparatoire à l'examen d'entrée aux études d'ingénieurs. C'est là qu'il suit les cours du Père Henri Bosmans³, connu aujourd'hui comme un grand historien des mathématiques. Georges Lemaître gardera de son contact avec ce Jésuite un attrait pour la lecture des œuvres originales des grands mathématiciens. Plus tard, dans ses enseignements à Louvain, il lira, en latin ou en grec, des pages entières de grandes œuvres mathématiques à ses étudiants du cours de méthodologie des mathématiques.

Le temps d'une guerre

Après avoir réussi ses trois premières années d'études d'ingénieur des mines à l'Université Catholique de Louvain, la guerre vient le surprendre en août 1914. Lemaître va s'engager comme volontaire dans l'infanterie, puis il sera versé dans l'artillerie. Il participera à des batailles très dures sur le front de l'Yser. On a pu retrouver des traces de ses pensées et de ses activités datant de ce temps de guerre, dans les correspondances et les notes d'un de ses frères d'armes⁴. Il s'avère que Lemaître réfléchissait déjà à des problèmes cosmogoniques. Sur le front, il lit avidement les œuvres de Poincaré, dont *Electricité et Optique*, dont il a gardera l'exemplaire annoté (et contenant des indications sur les positions de sa batterie d'artillerie !) dans sa bibliothèque jusqu'à la fin de sa vie. Il est persuadé à cette époque que c'est la « lumière » (le rayonne-

3. M. Hermans, J.-F. Stoffel (ed.), *Le Père Henri Bosmans S.J. (1852-1928): historien des mathématiques*, Bulletin de l'Académie royale de Belgique, Classe des sciences, volume 21.

4. Il s'agit de Joris Van Severen, un personnage vis-à-vis duquel Lemaître se distancierait progressivement et dont il ne partagera jamais les opinions politiques aussi extrêmes qu'instables. Cf. notre ouvrage : *L'itinéraire spirituel de Georges Lemaître*, suivi de « *Univers et Atome* » (inédit de G. Lemaître), Bruxelles, Lessius, 2007, pp. 19-41 ; D. Vanacker, « Het absolute geloof van Georges Lemaître » in *Joris Van Severen. Zijn persoon, zijn gedachten, zijn invloed, zijn werk. Jaarboek 5*, Ieper, Studie- en Coördinatiecentrum Joris Van Severen, 2001, pp. 5-40. ; J. Van Severen, *Die Vervloekte Oorlog. Dagboek 1914-1918*, Kapellen-Ieper, Pelckmans-Studiecentrum Joris Van Severen, 2005. La correspondance « Lemaître-Van Severen » a été déposée aux archives de la *Katholieke Universiteit Leuven* (Archief Joris Van Severen, 724).

ment) qui doit constituer l'élément fondamental à partir duquel toute la matière de l'univers a été engendrée.

C'est durant cette période, et non à la Maison Saint Rombaut comme on l'a dit trop souvent, qu'il rédige un manuscrit intitulé, « Les trois premières paroles de Dieu », dans lequel il tente une sorte d'exégèse concordiste des premiers versets de la Genèse. Durant ses permissions, il va très souvent à Paris et se procure les livres de Léon Bloy, célèbre écrivain polémiste. En 1916, il lui rendra visite dans le pavillon qu'il occupait à Bourg-la-Reine, et que lui avait laissé Charles Péguy. Lors de cette visite, Lemaître exposa les idées contenues dans « Les trois premières paroles de Dieu », mais Bloy le mit en garde contre son exégèse concordiste et le renvoya à l'étude des Pères de l'Eglise. Lemaître ne publiera jamais ce travail⁵, mais il conservera, en arrièrefond, jusqu'en 1930, l'idée qui y apparaît et qui est aussi liée, comme nous l'avons dit, à sa lecture d'*Electricité et Optique* de Poincaré, que la lumière (le rayonnement électromagnétique) est la réalité primordiale. Les années de guerre ont été pour le jeune Lemaître une période de réflexion profonde, scientifique et religieuse, et ceux qui l'ont connu sur le front, ont souligné les contours déjà exceptionnels de sa personnalité. Joris Van Severen écrit de lui dans son journal⁶: « Il changera toute la science – car il est un scientifique sérieux – et il bâtira une puissante et magnifique cosmogonie d'une valeur catholique simple et profonde (...) Aujourd'hui, j'ai contemplé de mes propres yeux les éclats du génie. Ce jeune est un homme admirable et un chrétien admirable ».

Une formation hors-norme

Durant l'année 1919-1920, ayant abandonné ses études d'ingénieurs, il décroche un « doctorat » (aujourd'hui un *master*) en sciences mathématiques et physiques à Louvain, en rédigeant une thèse sur l'approximation des fonctions de plusieurs variables réelles, sous la direction de Charles de la Vallée

5. C'est Jean-François Stoffel qui le fera en 1994 : J.-F. Stoffel (ed.), *Mgr Georges Lemaître savant et croyant (Actes du colloque tenu à Louvain-la-Neuve le 4-11-1994)*, Louvain-la-Neuve, Centre interfacultaire en histoire des sciences, 1996, Réminiscences 3, pp. 107-111.

6. *Dagboek 1914-1918, op.cit.*, p. 216 (notre traduction).

Poussin⁷. Cette même année, il étudie aussi à l'Institut Supérieur de Philosophie où il obtient un diplôme de baccalauréat en Philosophie thomiste. Cette formation le marquera profondément et restera sa référence en termes philosophiques.

En octobre 1920, il entre à la Maison Saint Rombaut, une annexe du Séminaire de Malines situé juste à côté du palais du cardinal Mercier, destinée à former les vocations tardives. C'est là qu'il se prépare à devenir prêtre, tout en continuant à étudier en profondeur, avec les encouragements de Mgr Mercier, les articles et livres de relativité restreinte et générale. Parmi tous les auteurs qu'il lit c'est Einstein, Eddington et De Donder (de l'Université Libre de Bruxelles) qui constituent ses références fondamentales. Ses lectures déboucheront sur une synthèse intitulée : « La physique d'Einstein ». Celle-ci lui fera gagner le Concours des bourses de voyage qui lui permettra, après son ordination, le 22 septembre 1923, de partir étudier une année à Cambridge (Grande-Bretagne) avec Eddington. L'influence de ce dernier sur le jeune Lemaître sera profonde. L'oeuvre de celui-ci doit énormément aux suggestions, aux questions et à la lecture minutieuse des travaux du célèbre astronome anglais. Il est intéressant de noter que la toute première publication scientifique de Lemaître est dédiée à l'étude du calcul variationnel développé par De Donder⁸, qui reste encore aujourd'hui un objet d'étude en physique théorique.

Durant l'année 1924-25, Lemaître se rend au *Harvard College Observatory* dirigé par Harlow Shapley et commence une thèse de doctorat en physique au *M.I.T.*, sous la direction de son compatriote Paul Heymans. Le sujet de la thèse de Lemaître, qui a été suggéré par Eddington, constitue une modification du problème résolu par l'astronome allemand Karl Schwarzschild en 1916. Ce dernier avait trouvé des solutions des équations d'Einstein de la relativité générale, correspondant aux champs de gravitation à l'intérieur et à l'extérieur d'une sphère de densité uniforme. Pour la solution « intérieure », il existe un rayon et une masse limites de la sphère, au-delà desquels celle-ci ne peut plus exister, la pression au centre devenant infinie. Lemaître étudia si ce

7. « Charles de la Vallée Poussin » (adresse de F. Kaisin et H. Dopp ; allocution de M. H. Lebesgue), *Revue des Questions Scientifiques*, XCIV, 4^{ème} série XIV (1928) 5-15.

8. G. Lemaître, « Sur une propriété des Hamiltoniens d'un multiplicateur » (note présentée par Th. De Donder lors de la séance du 4 août 1923) *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. IX, 1923, n°7-9, pp. 380-388.

rayon maximum, existait encore lorsqu'on renonce à l'hypothèse d'une densité uniforme⁹ pour adopter celle de la constance d'une grandeur invariante relativiste : la trace du tenseur d'énergie-impulsion. Dans ce cas, Lemaître trouva, à l'aide de calculs numériques ardues, que le résultat est encore plus étonnant que dans le cas envisagé par Schwarzschild. Le rayon limite est atteint, en effet, pour une valeur finie de la pression centrale. Cette thèse, encore inédite, est intéressante, car Lemaître y jette les bases de son étude des champs de gravitation inhomogènes à symétrie sphérique, qui lui servira, dans les années trente, pour donner un modèle de formation des galaxies et de leurs amas. Durant son passage au M.I.T., il fait la connaissance du physicien Vallarta. Le 15 décembre 1926, son *PhD* est accepté, sans soutenance, par un jury du *M.I.T.* dans lequel se trouve Norbert Wiener, le futur père de la cybernétique.

L'univers en expansion et la loi de Hubble-Lemaître

Avant de rentrer à l'Université de Louvain, pour y occuper, en octobre 1925, un poste de professeur qu'il conservera jusqu'en 1964, Lemaître eut l'occasion de visiter un certain nombre de lieux prestigieux de l'astronomie, dont le *Mount Wilson Observatory*, et d'entendre des communications concernant la nature extra-galactique, les distances et les vitesses¹⁰ de ce que l'on appelait encore à l'époque les « nébuleuses »¹¹. Il fut donc naturellement conduit à chercher une explication du phénomène de récession des nébuleuses découvert par Hubble. À l'époque, Lemaître ignorait l'existence des travaux de Friedmann sur les modèles d'univers homogènes et isotropes en expansion et à géométrie spatiale sphérique (1922) ou hyperbolique (1924). Il faut dire qu'Einstein lui-même n'appréciait guère ces solutions non-statiques¹² et que la communauté des astronomes se référait alors aux deux modèles d'univers lar-

9. En relativité, l'énergie peut se transformer en masse, la densité d'énergie n'est donc pas un invariant relativiste.
10. Lemaître rencontra personnellement Vesto Slipher qui fut le premier, en 1912, à découvrir le décalage vers le rouge du spectre lumineux des « nébuleuses extragalactiques » (des galaxies dans la terminologie actuelle), ce qui permettait de calculer la vitesse de celles-ci.
11. Il s'agit des galaxies. Ce n'est qu'à la fin de l'année 1924 que Hubble peut établir de manière fiable que la « Nébuleuse d'Andromède » est située en-dehors de notre Galaxie grâce à une méthode de mesure de la distance basée sur les Céphéides.
12. Cfr A. Friedmann, G. Lemaître. *Essais de cosmologie* précédés de *L'Invention du Big Bang* par Jean-Pierre Luminet, Paris, Seuil, 1997, Sources du savoir, pp.43-48.

gement connus : d'une part l'univers d'Einstein de masse constante et n'évoluant pas dans le temps et d'autre part l'univers vide de matière de l'astronome hollandais de Sitter. En 1927, l'abbé Lemaître dérive une solution des équations d'Einstein correspondant à un univers homogène, sphérique, de masse constante et dont le rayon croît de manière exponentielle¹³. À un temps infini dans le passé, cette solution tend vers un univers à rayon constant qui n'est autre que l'univers d'Einstein. À un temps infini dans le futur, l'univers de Lemaître (dont la masse est constante et le rayon tend vers l'infini) rejoint l'univers de de Sitter dont la densité de matière est nulle. Au moyen de son modèle d'univers, il montre que la croissance du rayon en fonction du temps peut expliquer la vitesse de fuite des galaxies. Il dérive la relation entre cette vitesse (v) et la distance (d) des galaxies et obtient ce que nous appelons aujourd'hui la « loi de Hubble » ($v=Hd$), qui ne sera publiée, par l'astronome américain, qu'en 1929. Se basant sur un catalogue de 42 galaxies établi par Hubble et Strömberg, il donna une estimation de la constante de Hubble (H) de 625 km/sec. Mpc¹⁴ ou de 575 km/sec. Mpc, selon qu'on tienne ou non compte d'une correction statistique.

Cet article fondamental de Lemaître ne sera publié en traduction anglaise qu'en 1931¹⁵ et cela à la demande d'Eddington lui-même. En fait, Lemaître lui avait envoyé l'article en 1927, mais l'astronome anglais ne l'avait pas lu. Une polémique est née récemment à propos de cette traduction. En effet, le paragraphe dans lequel Lemaître explique comment il arrive à la valeur de H à partir des données observationnelles de 42 galaxies (nébuleuses) trouvées par Edwin Hubble et aussi par Gustav Strömberg (de l'Observatoire du Mont Wilson en Californie) a disparu dans la traduction anglaise. Certains ont fait remarquer¹⁶ que cette disparition pourrait être liée à une censure liée à des pressions qu'aurait pu exercer Hubble lui-même auprès de l'éditeur de la revue, l'astronome américain redoutant de perdre la priorité de la découverte de

13. « Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques », *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, t.XLVII, 1927, pp.49-59.

14. Ceci signifie que les galaxies qui se trouvent à un million de parsecs (1 Mpc) sont animées d'une vitesse de 625 km/sec.

15. G. Lemaître, « The expanding universe » (communiqué par A.S. Eddington), *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, t. XCI, mars 1931, n°5, pp. 490-501.

16. M. Détruy, « Comment la fuite des galaxies a échappé à son découvreur », *Ciel et Espace*, janvier 2012, pp.100-103.

la loi qui porte son nom. En fait il n'en est rien¹⁷. C'est bien Lemaître qui a traduit son article en anglais et qui a retiré le paragraphe en question. Mario Livio de Baltimore a retrouvé une lettre de Lemaître dans lequel il affirme, à destination de la revue anglaise, qu'« il n'y a pas lieu, à mon sens, de republier la discussion provisoire sur les vitesses radiales (des nébuleuses), qui n'est plus d'aucune utilité maintenant »¹⁸. En fait, l'abbé estimait que les données astronomiques qu'il avait utilisées entre 1925 et 1927 n'étaient plus à la page. Et c'est tout à fait compréhensible, car ces données si on les regarde de près ne donnent que très imparfaitement la relation linéaire $v=Hd$. En 1931, de nouvelles données permettaient de valider cette relation d'une manière beaucoup plus précise. On voit ici l'un des traits caractéristiques de la personnalité scientifique de Georges Lemaître : l'importance cruciale qu'il a toujours accordé aux données d'observation astronomiques. Remarquons aussi que pendant toute sa vie, Lemaître a toujours accordé à Hubble la priorité de la découverte de la loi qui porte son nom. Il dit d'ailleurs dans un compte rendu au livre de Paul Couderc, *L'expansion de l'Univers* (Paris, P.U.F., 1950)¹⁹ : « il ne pouvait pas être question (en 1927) d'établir la loi de Hubble, mais seulement d'en calculer le coefficient ». Couderc, dans son ouvrage, a été probablement le premier à vouloir explicitement souligner que Lemaître a une priorité sur Hubble. Et c'est cela qui, curieusement, a fait réagir fortement Lemaître, qui taxa les propos de Couderc de « légende ». Ce dernier en fut très blessé et il lui répondit dans une lettre datée du 15 octobre 1950²⁰ :

« (...) que votre théorie ait conclu dès 1927, 1°) à la généralité des récessions, 2°) à la loi linéaire, 3°) à la valeur 575 du coefficient d'expansion (vous voulez bien le rappeler vous-même) – Tout cela avant la loi empirique de Hubble – voilà l'argument essentiel que j'ai cru soumettre au lecteur. Cette antériorité ²¹ de votre travail reste encore pour moi aujourd'hui une des raisons les plus fortes que j'aie de m'attacher à la théorie. À mes yeux, la légende ne va pas bien loin, tandis que l'argument profond me paraît garder toute sa force. »

Avec le recul, et passant outre la modestie du chanoine, il nous faut avouer que c'est bien Couderc qui avait ici raison !

17. D. Lambert, « L'affaire Hubble-Lemaître résolue », *Pour la Science*, n°412, février 2012, pp.78-81.

18. M. Livio, « Mystery of the missing text solved », *Nature*, 479 (2011) 171-173.

19. G. Lemaître, « Compte rendu de P. Couderc : « L'expansion de l'univers » (1950) », *Annales d'Astrophysique*, t. XIII, 1950, n°3, pp. 344-345.

20. Lettre de P. Couderc (Observatoire de Paris) à G. Lemaître, Archives Lemaître, Louvain-la-Neuve.

21. Souligné par P. Couderc.

Dès 1927, Lemaître connaissait toutes les solutions des équations d'Einstein pour les univers homogènes et isotropes. Pourquoi a-t-il privilégié un modèle dont le rayon croît exponentiellement? En fait son choix est lié à la surestimation de la constante de Hubble. L'inverse de celle-ci donne un ordre de grandeur de la période récente d'expansion ($1/H=d/v$). Or, avec l'estimation adoptée par Lemaître, cette période est de l'ordre d'un milliard d'années seulement, ce qui est inférieur à l'estimation de l'âge de la Terre donnée par les géologues. Le modèle à expansion exponentielle permet de réconcilier la théorie avec les observations astronomiques et géologiques, car il donne à l'univers un passé infini durant lequel son rayon est quasi-statique tout en admettant une période d'expansion effective et récente de durée finie.

L'atome primitif : origine et fécondité d'une hypothèse cosmologique

Le premier modèle d'univers de Lemaître n'a ni commencement (singularité initiale) ni fin (singularité finale) physiques. C'est Eddington qui, en 1931, suscita, chez son élève de Louvain, un intérêt pour la question d'une possible origine de l'univers. En effet, cette année-là, l'astronome de Cambridge publia dans *Nature*, un article où il déclara²² : « *Philosophically the notion of a beginning of the present order of nature is repugnant for me* ». Lemaître réagit, en publiant, dans le même journal, une courte note montrant que la thermodynamique et la théorie quantique²³ peuvent donner un sens « physique » à un commencement de l'univers²⁴. Celui-ci correspondrait à un

22. A. Eddington, « The End of the World from the Standpoint of Mathematical Physics », *Nature*, t.127, 1931, p.450.

23. À propos de la place de la mécanique quantique dans l'œuvre de Lemaître : D. Lambert, « La réception de la mécanique quantique chez Georges Lemaître » in *Les Quanta : Un siècle après Planck (Actes du colloque organisé par la Fondation Louis de Broglie, Académie des Sciences, Paris, 15-12-2000)*, Paris, E.D.P. Sciences, 2003, pp.39-55. G. Lemaître a étudié la mécanique quantique naissante, mais il ne s'y est plus guère intéressé; le passage suivant est révélateur: "Cela a amené la théorie quantique à renoncer à une conception trop déterminée du monde en alliant corpuscules et ondes dans une description à la fois puissante et décevante" ("L'étrangeté de l'Univers", *La Revue Générale Belge*, t. XCVI, juin 1960, p.9). Dans les années cinquante, les allusions à la mécanique quantique concernent en fait uniquement le formalisme algébrique utilisé dans la théorie quantique des champs (algèbres de Clifford et spineurs) mais jamais des problèmes physiques proprement dits.

24. G. Lemaître « The Beginning of the World from the point of view of Quantum Theory », *Nature*, t.127, 1931, p.706.

état où tous les *quanta* d'énergie sont rassemblés en un seul *quantum* qu'il appelle l'*atome primitif*²⁵. Lorsque nous remontons à celui-ci, les notions d'espace et de temps s'évanouissent petit à petit ainsi que tous les concepts physiques servant à décrire l'état présent de l'univers. Ainsi, pour Lemaître, « *such a beginning of the world is far enough from the present order of Nature to be not at all repugnant* ». Pour Lemaître, les notions spatio-temporelles n'acquièrent un sens (statistique) qu'au fur et à mesure des désintégrations successives et intrinsèquement aléatoires qui, à partir de l'atome primitif, engendrent la matière que nous connaissons actuellement en même temps que l'espace-temps. Lemaître n'a jamais écrit un formalisme précis pour décrire ces processus de désintégrations. Il ne s'intéressa jamais vraiment à la physique nucléaire, ce qui explique peut-être pourquoi il ne chercha jamais à se mettre en contact avec Gamow et ses collaborateurs, dont nous verrons, plus loin, qu'ils avaient réalisé un véritable modèle physique de l'atome primitif. L'idée de l'atome primitif est donc seulement une hypothèse intuitive et non un concept physique rigoureusement défini. Lemaître manifestera d'ailleurs un certain nombre d'hésitations relatives à la véritable nature de cet « atome ». Néanmoins, cette hypothèse fut d'une très grande fécondité scientifique, comme nous le verrons dans la suite.

L'hypothèse de l'atome primitif a été, avons-nous vu, provoquée par une déclaration d'Eddington. Cependant, il est clair que Lemaître réfléchissait depuis longtemps à la question de l'origine de la matière présente dans l'univers. Nous avons vu que cela occupe déjà ses pensées durant la Grande Guerre, avant même qu'il n'eût découvert la relativité générale. Si nous essayons de préciser le contexte qui mène à la découverte de l'hypothèse²⁶, nous remarquons qu'entre 1927 et 1931, Lemaître est guidé par l'idée que la lumière ou le rayonnement est le fondement à partir duquel toute la matière peut être engendrée.

25. Ce terme apparaît pour la première fois dans une communication faite le 29 septembre 1931 à la *British Association for the Advancement of Science* : « The evolution of the universe : Discussion », in *British association for the advancement of science : Report of the centenary meeting. London, 1931, september 23-30*, London, Office of the British Association, 1932, pp. 573-610 (intervention de Lemaître, pp. 605-610) ; « Discussion » (traduction de l'intervention de G. Lemaître) in *Discussion sur l'évolution de l'univers* (traduction et avant-propos de P. Couderc), Paris, Gauthier-Villars, 1933, pp. 15-22.

26. Le contexte de découverte disons-nous bien et non le contexte de justification qui est donné après-coup et qui se fonde sur la logique conceptuelle et non sur les conditions parfois non totalement rationnelles qui mènent à une découverte.

Remarquons bien qu'il s'agit ici d'une idée liée à l'origine de la matière et non au commencement de l'univers car il y a bien deux éléments conceptuellement distincts dans l'hypothèse de l'atome primitif : un principe explicatif de *l'origine commune et profonde des éléments matériels* que l'on trouve dans le cosmos (ceux-ci dérivent du contenu d'un *quantum* initial *logiquement* antérieur au commencement de l'univers) et un principe explicatif de *la naissance de l'espace-temps* (qui commence avec la *désintégration* supposée de l'atome primitif). Les idées qui s'enracinent dans les réflexions qui remontent à la Grande Guerre ne concernent que la nature de l'atome primitif et non le mode de naissance de l'univers (assimilé à la singularité initiale d'un modèle cosmologique relativiste).

Déjà à la fin de son fameux article de 1927, Lemaître propose de manière tout à fait étonnante, et d'ailleurs sans lien apparent avec le reste de l'article, la réflexion suivante²⁷ :

« Il resterait à rendre compte de la cause de l'expansion de l'univers. Nous avons vu que la pression de radiation travaille lors de l'expansion. Ceci semble suggérer que cette expansion a été produite par la radiation elle-même. Dans un univers statique, la lumière émise par la matière parcourt l'espace fermé, revient à son point de départ et s'accumule sans cesse. Il semble que là doit être cherchée l'origine de la vitesse d'expansion R/R qu'Einstein supposait nulle et qui dans notre interprétation est observée comme vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques. »

Le rayonnement est envisagé ici comme une cause de l'expansion. Ce rayonnement va encore trouver une place dans les réflexions cosmologiques de Lemaître un peu plus tard. L'abbé avait été fasciné par la théorie de Millikan sur l'origine des rayons cosmiques. Ce dernier pensait, à tort, que tous les rayons cosmiques, ces rayonnements très énergétiques qui étaient captés par les observatoires de haute montagne ou par les ballons, étaient formés par du rayonnement électromagnétique. Celui-ci provenait selon lui de l'énergie perdue lors de la formation de noyaux dans l'univers, engendrée par la rencontre de protons et d'électrons, ceux-ci étant eux-mêmes produits à partir d'un rayonnement originel. Ce cycle hautement hypothétique : « *rayonnement primitif-particules élémentaires-noyaux-rayonnement cosmique* (restaurant le

27. G. Lemaître, « Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques » (séance du 25 avril 1927), *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série A : Sciences Mathématiques, 1^{re} partie : Comptes rendus des Séances, t. XLVII, 1927, pp. 49-59.

rayonnement primitif) », n'existe pas, mais il avait été inventé curieusement par Millikan comme un moyen de refaire de l'ordre localement dans l'univers et, par là, d'éviter la mort thermodynamique liée au second principe dont il niait la validité à l'échelle du cosmos tout entier²⁸. Sans entrer dans ces considérations sur la validité du second principe et sur le caractère cyclique du processus, Lemaître reprend à Millikan l'idée d'une genèse de la matière à partir d'un rayonnement et l'adapte au contexte d'un univers en expansion et, en juin 1930, il dit²⁹ :

« On pourrait admettre que la lumière a été l'état originel de la matière et que toute la matière condensée en étoiles s'est formée par le processus proposé par Millikan. »

La matière provient donc, suivant cette idée d'un rayonnement originel. Il est fort probable que ce soit cette idée, qui, après une traduction de la notion de rayonnement originel en termes de *quantum* initial, ait mis Lemaître sur la piste de ce qui allait devenir, en mai, puis en septembre 1931, l'intuition de l'atome (*quantum*) primitif. Le 29 septembre 1931 dans une discussion organisée à l'occasion du centenaire de la *British Association for the Advancement of Science*, Lemaître note encore, à la suite d'une discussion sur l'origine de l'expansion de l'univers : « un monde plein de radiation commence à se dilater dès que la radiation peut se transformer en matière ». Dans cette discussion, on peut vérifier, en accord avec ce qui a été dit plus haut, qu'une réflexion sur les rayons cosmiques a bel et bien été un élément déterminant pour arriver à l'hypothèse de l'atome primitif³⁰ :

28. H. Kragh, D. Lambert, « The context of discovery: Lemaître and the origin of the primeval-atom universe », *Annals of Science*, 64 (2008) 445-470.

29. G. Lemaître, « L'hypothèse de Millikan-Cameron dans un univers de rayon variable » in *Comptes rendus du Congrès national des sciences organisé par la fédération belge des sociétés scientifiques. Bruxelles, 29 Juin-2 Juillet 1930*, Bruxelles, Fédération Belge des Sociétés Scientifiques, 1930, p. 182.

30. « The evolution of the universe: Contributions to a British association discussion on the évolution of the universe » (communications de J. Jeans, G. Lemaître, W. de Sitter, A. Eddington, R.A. Millikan, E.A. Milne, J.C. Smuts, E.W. Barnes et O. Lodge ; discussion tenue le 29 septembre 1931 dans la section des sciences mathématiques et physiques du colloque du centenaire de la *British association for the advancement of science*), *Nature: Supplément*, t. CXXVIII, 24 octobre 1931, n°3234, pp. 699-722 (communication de G. Lemaître, pp. 704-706). Nous utilisons ici la traduction française : "Discussion" (traduction de l'intervention de G. Lemaître) in *Discussion sur l'évolution de l'univers* (traduction et avant-propos de P. Couderc), Paris, Gauthier-Villars, 1933, pp. 15-22 (extraits p.16, 21).

« Nous avons besoin d'une théorie d'évolution en « feu d'artifice ». Les deux derniers milliards d'années témoignent d'une évolution lente : ce sont les cendres et la fumée d'un feu d'artifice brillant mais très rapide. Je pense que la clef du problème est apportée par la découverte des rayons cosmiques (...) Je dépeindrais ainsi l'évolution : à l'origine toute la masse de l'Univers existait sous la forme d'un atome unique ; le rayon de l'Univers, quoique non strictement nul, était relativement très petit. Tout l'Univers résulte de la désintégration de cet atome primitif. »

Après 1931, on ne retrouvera plus d'allusion au rayonnement initial. Cependant, toute l'explication de la genèse des éléments chez Lemaître reposera jusqu'à la fin de sa vie, sur leur émergence à partir du *quantum* initial. Et, en 1949, dans un curieux article intitulé « L'énigme de l'hydrogène », le chanoine envisage d'expliquer l'abondance de cet élément par une matérialisation de l'énergie des rayons cosmiques³¹ :

« L'hydrogène dont la grande abondance nous paraissait si énigmatique serait en quelque sorte d'origine secondaire en ce sens qu'il aurait été formé jadis par absorption des rayons cosmiques par un phénomène de matérialisation analogue à celui par lequel les rayons cosmiques matérialisent encore aujourd'hui les mésons aux dépens de l'énergie cinétique incidente. »

Nous avons dit plus haut qu'il ne faut pas confondre, dans l'hypothèse de l'atome primitif, deux éléments distincts : une explication de l'*origine et de la nature profonde de l'énergie-matière* (dont l'intuition remonte probablement aux pensées de la première guerre et à l'influence de Millikan) et une explication du *commencement physique de l'univers* (dont la description provient de la relativité générale). Il est intéressant de distinguer les deux, car cela permet de préciser que Lemaître donnait un sens véritable à un état de l'univers *logiquement* antérieur au commencement l'espace et du temps. Cette idée rejoint les réflexions les plus contemporaines issues de modèles mathématiques qui tentent de décrire l'émergence de la structure d'espace-temps à partir d'une structure logiquement plus fondamentale. Pour Lemaître, l'espace et le temps sont des grandeurs qui émergent progressivement, statistiquement à mesure que se fragmente l'atome primitif.

31. G. Lemaître, « L'énigme de l'hydrogène » (conférence prononcée à la séance publique du 16 décembre 1949), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. XXXV, 1949, pp. 1158-1163. Republié dans : *Georges Lemaître et l'Académie Royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 125-129, Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t. X.

Entre 1931 et 1940, la cosmologie de l'atome primitif suscita un intérêt parmi la communauté scientifique, même si une méfiance commença à poindre çà et là chez ceux qui lui reprochaient de ne pas être fondée sur des données d'observation assez solides ou chez ceux qui soupçonnaient que l'hypothèse de l'atome primitif cachait quelque intention apologétique. Il n'y a guère que Georges Gamow et ses étudiants, Mayer et Teller, qui s'intéresseront de près à l'hypothèse en cherchant à la développer sur le plan de la physique nucléaire³². Gamow imaginait que l'état initial de l'univers pouvait être constitué d'une boule de neutrons (le « polyneutron »). La désintégration bêta du neutron produisant des protons, tous les ingrédients étaient alors réunis pour que fleurissent sur ce « polyneutron » des noyaux d'hélium... Lemaître ne s'intéressant pas à la physique des particules, qu'il considérait selon ses propres termes comme de « l'entomologie », n'accorda jamais aucune attention à cette description qui tentait pourtant de donner un véritable contenu physique à l'atome primitif.

À partir des années quarante, une cosmologie alternative vit le jour en opposition explicite aux idées de Lemaître³³. Hermann Bondi, Fred Hoyle et Thomas Gold mirent sur pied la *Steady state cosmology*, la cosmologie de l'état stationnaire, dans laquelle l'univers est toujours et partout le même, emporté dans une dynamique d'expansion sans début ni fin singuliers³⁴. Jusqu'en 1965, date à laquelle on découvrit le *rayonnement cosmologique de fond* (cfr plus loin), la grande majorité des cosmologistes adoptèrent le modèle de l'état stationnaire³⁵. Les idées de Lemaître apparaissaient, à cette époque, complètement dépassées et faisaient la risée de la jeune génération. Le terme de *Big Bang* est né à cette époque où Fred Hoyle l'a forgé pour se moquer de l'hypothèse de l'atome primitif envisagée ironiquement comme la cosmologie du « grand boum » ! Si Lemaître et Hoyle n'étaient pas d'accord sur le modèle d'univers à adopter et si le second aimait à se moquer du premier, ils étaient pourtant d'excellents amis. Dans un beau livre biographique Hoyle raconte d'ailleurs des épisodes savoureux d'un voyage qu'il effectua en 1957 avec Lemaître de

32. Cfr G. Gamow, *La création de l'univers* (trad. par G. Guéron), Paris, Dunod, 1961, pp. 56-79.

33. Lemaître a donné une belle synthèse de ses idées cosmologiques en 1949 dans : « Cosmological applications of Relativity », *Reviews of Modern Physics*, 21 (1949) 357-366.

34. Cfr H. Kragh, *Cosmology and Controversy. The Historical Development of Two Theories of the Universe*, Princeton University Press, 1996.

35. Le lecteur lira avec intérêt l'article de Th. Lepeltier, « Quand fallait-il abandonner la théorie de l'état stationnaire ? », *Revue des Questions Scientifiques*, 181 (2010) 513-522.

Rome vers le sud de Naples, suivi d'un retour à travers toute l'Italie jusqu'en Suisse³⁶. Ces vacances ont donné lieu à la création, par Jean-François Viot, d'une très belle pièce de théâtre : « Sur la route de Montalcino », mise en scène par Olivier Leborgne³⁷. La controverse entre la cosmologie de l'atome primitif et celle de l'état stationnaire avait fait l'objet d'un petit opéra écrit par Gamow lui-même et intitulé : « l'Opéra cosmique » dont un passage donne bien le ton³⁸ :

« (...) l'entrée en scène d'un homme ramena le silence. Vêtu d'une soutane fermée par un col romain, il s'agissait selon le programme de l'abbé Georges Lemaître, le premier homme à proposer la théorie du *big bang* et de l'Univers en expansion. Chantant avec un fort accent belge, il entama son aria :

« Ô Atome primordial !
 Atome contenant tout !
 Dissous en fragments excessivement petits.
 Galaxies formées,
 Chacune avec son énergie primale !
 Ô Atome radioactif
 Ô Atome contenant tout !
 Ô Atome Univers-
 Œuvre du Seigneur !
 La longue évolution
 Parle d'immenses feux d'artifice
 Finissant en cendres et flammèches rougeantes... »

On ne peut qu'admirer la connaissance que Gamow avait des idées de Lemaître qui dit dans son fameux ouvrage *L'hypothèse de l'atome primitif*³⁹ :

« L'évolution du monde peut être comparée à un feu d'artifice qui vient de

36. F. Hoyle, *Home is where the wind blows. A chapter from a cosmologist's life*, University Science Books, Mill Valley, California, 1994, pp. 299-302.

37. J.-F. Viot, *Sur la route de Montalcino*, Bruxelles, Le Cri, 2009.

38. G. Gamow, R. Stannard, *Le nouveau monde de M. Tompkins*, Paris, Le Pommier, 2007, pp. 93-104 (chapite sixième : « Un opéra cosmique ») ; extrait, pp. 97-98. L'ouvrage est une réactualisation de l'ouvrage de Gamow, mais l'« opéra » a été conservé dans la version originale.

39. G. Lemaître, *L'hypothèse de l'atome primitif: Essai de cosmogonie* (préface de F. Gonseth), suivi de *L'hypothèse de l'atome primitif et le problème des amas de galaxies: Rapport présenté par G. Lemaître au onzième Conseil de physique de l'Institut international de physique Solway, juin 1958*, et de *Georges Lemaître et son œuvre. Bibliographie des travaux de Georges Lemaître* par O. Godart, Bruxelles, Éditions Culture et Civilisation, 1972, 203 pages + 99 pages de supplément, Epistémè, p. 90.

se terminer. Quelques mèches rouges, cendres et fumées. Debout sur une escarville mieux refroidie, nous voyons s'éteindre doucement les soleils et cherchons à reconstituer l'éclat disparu de la formation des mondes ».

Une cosmologie en trois temps

L'idée de l'atome primitif⁴⁰ conduisit Lemaître à abandonner son modèle d'univers de 1927 et à adopter un modèle où l'âge de l'univers est fini. Il s'agit d'un univers homogène, sphérique, dont l'évolution, débutant par une singularité initiale (vue comme la limite de la physique), est régie par deux « forces » antagonistes : d'une part la force gravitationnelle liée à l'attraction des masses présentes dans l'univers et d'autre part une « force répulsive », dont l'intensité est fixée par une valeur positive de la constante cosmologique⁴¹. Ce modèle d'univers, qu'il défendra jusqu'à la fin de sa vie, comprend trois phases caractéristiques.

Au cours de *la première phase*, qui débute à la singularité initiale, l'univers subit une expansion décélérée et se remplit des produits de désintégrations de l'atome primitif. Au cours de *la deuxième phase*, le rayon de l'univers reste quasi-statique, comme s'il était pareil à l'univers d'Einstein, l'attraction gravitationnelle compensant la « force répulsive ». Au rythme des fluctuations statistiques, les poussières matérielles se condensent, çà et là, pour donner naissance aux galaxies et à leurs amas. Pour comprendre les caractéristiques de ces structures qui créent localement des inhomogénéités dans l'univers, Lemaître utilisa le modèle du champ de gravitation produit par des distributions de densité inhomogènes à symétrie sphérique qu'il avait développé dans sa thèse du M.I.T. en 1925. Il montra ainsi que son estimation de la taille des amas de galaxies était en accord avec les observations faites par Hubble sur

40. Elle sera popularisée dans le livre de vulgarisation de G. Lemaître, *L'hypothèse de l'atome primitif : essai de cosmogonie* (préface de F. Gonseth), Neuchâtel, Editions du Griffon, 1946 (*The Primeval Atom : A hypothesis of the Origin of the Universe* (translated by B.H. Korff, S.A. Korff, with an introduction by H.N. Russel), New York-London, Van Nostrand Company, 1950).

41. L'équation qui décrit l'évolution, en fonction du temps, de la distance $R(t)$ entre les points du cosmos de Lemaître s'écrit : $(dR/dt)^2 = -kc^2 + (\Lambda c^2 R^2)/3 + (2GM/R)$ où k est la courbure de l'espace ($k=+1$ pour l'espace sphérique de Lemaître), c la vitesse de la lumière, G la constante de Newton, M la masse et Λ la *constante cosmologique*. Le deuxième terme du membre de droite s'interprète comme une énergie liée à une force *répulsive* dont l'intensité est modulée par Λ . Le troisième terme est le double d'une énergie potentielle dérivant d'une force gravitationnelle *attractive*.

l'amas de Comas⁴². Le modèle de Lemaître fut utilisé, dès 1934, par le célèbre physicien du Caltech Richard Tolman et il fut dès lors nommé, dans la suite, « modèle de Tolman »⁴³. Aujourd'hui, après les travaux de Bonnor, par exemple, on sait que le type de fluctuations qu'envisageait Lemaître ne peut mener à la formation des grandes structures que nous observons aujourd'hui. Néanmoins, l'idée de leur formation à partir de condensations locales de matière reste encore très féconde. Lemaître avait montré, au début des années trente, que l'univers statique d'Einstein est instable sous l'effet de la formation de condensations locales de matière. La formation des grandes structures, durant la deuxième phase (quasi-statique) de l'évolution de l'univers, provoque, de la même façon, une instabilité qui a pour conséquence une reprise de l'expansion et cette fois-ci de manière accélérée. Cette expansion accélérée définit *la troisième phase* de l'histoire du Cosmos de Lemaître. Au cours de celle-ci, dans laquelle nous nous trouvons aujourd'hui, les galaxies s'éloignent les unes des autres conformément à la loi de Hubble (l'inverse de cette constante donnant une idée de la durée de cette troisième phase). Remarquons au passage que les deux dernières phases reproduisent en fait, essentiellement, les caractéristiques du modèle d'univers de 1927, c'est-à-dire une ère quasi-statique, « einsteinienne », suivie d'une autre, accélérée.

Lemaître attache beaucoup d'importance à la constante cosmologique, opposé en cela à Einstein qui la considère comme superflue pour des raisons esthétiques et aussi parce qu'elle n'est pas nécessairement requise, dans tous les modèles d'univers, pour expliquer le phénomène d'expansion. Visionnaire, le cosmologiste de Louvain estimait que la mécanique quantique pourrait donner une interprétation physique à cette constante. On sait aujourd'hui qu'elle peut être liée à la contribution de l'énergie du vide quantique⁴⁴. En changeant la valeur de la constante cosmologique, on peut également allonger

42. G. Lemaître, « L'univers en expansion », *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, t.LIII, 1933, pp.51-85 (traduction anglaise de M.A.H. MacCallum: « The Expanding Universe », *General Relativity and Gravitation*, t.29, 1997, pp.641-680).

43. Cfr A. Krasinski, *Inhomogeneous Cosmological Models*, Cambridge University Press, 1997 ; une étude exhaustive de ce modèle et de ses généralisations est donnée dans le livre de J. Plebanski, A. Krasinski, *An Introduction to General Relativity and Cosmology*, Cambridge University Press, 2006, pp. 294-366.

44. Cfr L. Krauss, « L'antigravité », *Pour la Science*, n°257, mars 1999, pp.42-49. Lemaître est donc l'un des premiers à avoir soulevé ce que l'on nomme aujourd'hui le problème de l'énergie noire (qui correspond à plus de 70% du bilan d'énergie-matière de l'univers et qui est responsable de l'expansion accélérée actuelle de l'univers).

ou raccourcir l'âge de l'univers. Ceci constituait, pour Lemaître, un argument supplémentaire pour conserver la constante cosmologique. En effet, l'âge de l'univers, déterminé sur base de la seule constante de Hubble étant encore, dans les années trente, beaucoup trop petit (1 à 2 milliards d'années) par rapport à l'âge de la Terre, il convenait donc de trouver une manière de l'allonger significativement. Dès 1931, Lemaître attribuait à l'univers, sur base d'une borne supérieure acceptable pour la valeur de la constante cosmologique, un âge d'une dizaine de milliards d'années environ, ce qui cadre avec l'ordre de grandeur des estimations actuelles.

L'hypothèse de l'atome primitif et son scénario de genèse des éléments par désintégrations successives sont complètement abandonnés aujourd'hui. Néanmoins, les observations faites récemment sur les supernovae lointaines plaident pour une évolution du paramètre d'échelle de l'univers caractérisée par les trois phases dont nous venons de parler, avec une valeur non nulle et positive de la constante cosmologique. Cependant, à l'encontre de Lemaître, la géométrie spatiale de l'univers est, au vu des observations les plus récentes, euclidienne et non pas sphérique. L'univers est donc spatialement infini, ce que le chanoine n'acceptait pas admettant que l'univers doit rester fini pour qu'il puisse être appréhendé totalement par l'esprit humain.

Éliminer les singularités ? Des trous noirs aux univers phénix

En 1916, l'astronome allemand Karl Schwarzschild avait trouvé une solution des équations d'Einstein correspondant aux champs de gravitation qui existent à l'intérieur et à l'extérieur d'une sphère remplie d'un fluide de densité uniforme. La solution extérieure de Schwarzschild, présente une singularité, à une distance $r=2GM/c^2$ de la source de champ de masse M (G la constante de gravitation et c la vitesse de la lumière), qui est connue aujourd'hui comme étant un « horizon » et qui a été amplement décrite dans la théorie des trous noirs. Au début des années vingt, on se demandait si cette singularité représentait une véritable limite physique infranchissable, ou si elle était plutôt une singularité « fictive », c'est-à-dire une conséquence d'un choix particulier d'un système de coordonnées. Dès 1925, Lemaître avait réussi à éliminer ce genre de singularité « fictive » dans une représentation de l'univers de de Sitter. Dérivant la solution de Schwarzschild à partir du cadre général

de son modèle inhomogène à symétrie sphérique, Lemaître montra, en 1933, qu'en se plaçant dans un système particulier de coordonnées, l'on peut éliminer la singularité liée à « l'horizon de Schwarzschild »⁴⁵. Physiquement donc, une particule peut franchir l'horizon pour s'approcher de la source de champ. En fait Eddington avait déjà obtenu ce résultat en 1924, mais il n'en avait pas réalisé toute l'importance. Synge en 1950, puis Fronsdal en 1959 montreront que le système de coordonnées d'Eddington-Lemaître détermine une carte qui ne couvre en fait que « la moitié » de l'espace-temps défini par la solution de Schwarzschild. On doit à Kruskal et à Szekeres d'avoir exhibé, en 1960, un système de coordonnées couvrant toute cette structure spatio-temporelle. Les travaux de Lemaître sur « l'horizon » qui apparaît dans la solution de Schwarzschild peuvent donc être vus comme l'une des toutes premières contributions à la théorie des trous noirs⁴⁶.

En janvier 1933, Einstein rencontra Lemaître au *Caltech*, à Pasadena. Einstein lui demanda si l'on pouvait éliminer les singularités (initiale et finale, on dirait aujourd'hui le « *Big Bang* » et le « *Big Crunch* ») qui apparaissent dans « l'univers phénix » (univers homogène et isotrope dont le rayon varie de manière cycloïdale⁴⁷), en admettant une légère anisotropie de l'univers. Tous les modèles considérés par Lemaître et Friedmann sont isotropes, c'est-à-dire qu'ils ont les mêmes comportements physiques dans toutes les directions. Un exemple d'univers anisotrope serait celui qui subirait une expansion dans deux directions spatiales et une contraction dans la troisième (« univers crêpe »). Lemaître prouva rapidement, à l'aide d'un modèle simple d'univers anisotrope baptisé aujourd'hui « Modèle de Bianchi I », que la singularité ne disparaissait pas. Par ce travail, le cosmologiste de Louvain ouvrait ainsi la voie aux théorèmes de singularité de Penrose et Hawking qui montreront, plus tard, par des méthodes différentes, le caractère inévitable des singularités dans de larges classes d'espace-temps.

45. J. Eisenstaedt, « Histoire et singularités de la solution de Schwarzschild (1915-1923) », *Archive for the History of Exact Sciences*, 27 (2) (1982) 157-198.

46. Cfr J. Earman, *Bangs, crunches, Whimpers and Schrieks. Singularities and Acausalities in Relativistic Spacetimes*, Oxford University Press, 1995; *Trous noirs. Ces objets théoriques deviennent enfin réalité!*, Dossier de *Pour la Science*, n°75, avril-juin 2012.

47. Une cosmologie cyclique a été défendue ces derniers temps par Roger Penrose : *Cycle of Time. An extraordinary new view of the universe*, London, The Bodley Head, 2010.

Ce qui est important pour comprendre l'ouverture d'esprit de Lemaître, c'est de noter qu'il n'était nullement opposé de manière *a priori* à des univers phénix dont nous avons parlé. Il affirme dans les années cinquante⁴⁸ :

« (...) l'attitude dogmatique dans la science est particulièrement dangereuse. Il faut aborder le problème encore si obscur de l'évolution de la matière à partir de l'état hyper-dense sans aucun parti pris ; sans exclure assurément la possibilité d'un univers antérieur qui a été réduit en cendres et rebondit comme un phénix, mais sans exclure aussi l'éventualité d'une distribution d'entropie incompatible avec une évolution thermodynamique antérieure. »

Quaternions et spineurs : la face algébrique de l'œuvre de Lemaître

La géométrie spatiale des modèles d'univers étudiés par Lemaître est toujours celle d'une sphère de dimension 3 ou bien celle de l'espace projectif réel de dimension 3. Cet espace est l'ensemble de toutes les droites passant par l'origine d'un espace vectoriel de dimension 4 construit sur le corps des nombres réels. Il peut donc être vu comme une sphère de dimension 3 dont on a identifié les points diamétralement opposés (car une seule droite perce la sphère en deux points diamétralement opposés). Dans ces deux cas d'espaces dits « elliptiques », qui ne sont pas équivalents du point de vue de la topologie, il s'agit, comme il aimait à le dire, d'univers « finis mais sans borne ». Le volume en est fini, mais vous ne rencontrez jamais aucune frontière marquant les limites de cet espace. La sphère de dimension 3 peut être vue comme l'ensemble des *quaternions* de norme unité. Les quaternions, découverts en 1843 par William Rowan Hamilton, sont des nombres généralisant les nombres complexes. Lemaître s'intéressa donc fortement aux quaternions et consacra une publication et des manuscrits inédits à décrire les deux géométries possibles de son univers à l'aide de quaternions. Mais, il s'intéressa aussi à ce genre de nombres pour une raison que nous allons aborder maintenant.

Eddington avait formulé l'équation de Dirac, qui décrit l'électron relativiste, au moyen de 4 matrices antisymétriques en montrant que celles-ci peuvent être construites à partir de produits de 2 générateurs appartenant à deux

48. G. Lemaître, « Compte rendu de P. Couderc : «L'expansion de l'univers» (1950) », *Annales d'Astrophysique*, t. XIII, 1950, n°3, pp. 344-345.

algèbres de quaternions commutant entre elles. Utilisant cette construction, Eddington s'était rendu compte que l'on pouvait construire une cinquième matrice antisymétrique, anticommutant avec les 4 autres, permettant d'écrire une généralisation de l'équation de Dirac, qui serait comme une nouvelle équation fondamentale de la physique. Pour l'astronome anglais, l'algèbre de ces 5 matrices (les fameux « E-nombres » d'Eddington) joue un rôle central dans ce qui deviendra sa *fundamental theory*. Celle-ci est un cadre théorique dans lequel il prétend dériver la valeur des constantes fondamentales de la physique et, entre autres, la valeur $1/137$ de la « constante de structure fine » de l'électro-magnétisme, à partir des propriétés de ces E-nombres. Lemaître avait suivi la constitution progressive de cette *fundamental theory*. Dès son doctorat au M.I.T. il s'était intéressé aux tentatives faites par Eddington pour étendre la relativité générale, pour atteindre une théorie unitaire⁴⁹, mais il avait abandonné ce sujet ne voyant pas de connexion réelle avec des données vérifiables empiriquement. Il s'intéressa de nouveau aux travaux de son professeur de Cambridge, lorsque ce dernier proposa sa généralisation de l'équation de Dirac et il relut attentivement les épreuves du livre *Relativity Theory of Protons and Electrons*⁵⁰ d'Eddington dans lequel apparaît le projet de la *fundamental theory*⁵¹. Eddington le remerciera d'ailleurs dans la préface de cet ouvrage. Dans la conclusion d'un ouvrage datant de la fin des années trente, et qui sera seulement publié en 1985 par Michael Heller et Odon Godart, on voit l'importance que Lemaître accordait à cette théorie⁵². Au terme de sa conférence intitulée, « L'étrangeté de l'Univers », il revient encore, en 1960, sur les recherches d'Eddington concernant la généralisation de l'équation de Dirac dont nous allons parler maintenant⁵³.

49. Cfr M.-A. Tonnelat, *Les théories unitaires de l'électro-magnétisme et de la gravitation*, Paris, Gauthier-Villars, 1965, pp.266-273.

50. Cambridge University Press, 1936.

51. Cfr à ce propos : C.W. Kilmister, *Eddington's search for a fundamental theory*, Cambridge University Press, 1994.

52. *The expanding universe: Lemaître's unknown manuscript* (introduction by O. Godart and M. Heller), Tucson (Arizona), Pachart Publishing House, 1985, 50 pages, History of astronomy series, 2; cfr "Eddington's quantum theory", pp. 49-50.

53. G. Lemaître, « L'étrangeté de l'Univers » (conférence donnée le 8 avril), in *La scuola in Azione*, Varese, Multa Paucis, 1960, pp. 3-22, Notiziario per gli allievi, 15 ; republication : « L'étrangeté de l'Univers », *La Revue Générale Belge*, t. XCVI, juin 1960, pp. 1-14 (la conclusion se trouve pp. 13-14).

En 1931, Lemaître⁵⁴ montra, que l'équation d'Eddington généralisant celle de Dirac donne naissance, de manière tout à fait naturelle, à une autre équation (mais qui n'est plus une équation de Dirac généralisée) dont le groupe de covariance n'est autre que $SO(3,3)$ c'est-à-dire celui des matrices à déterminant $+1$ qui laissent invariante la forme quadratique suivante : $(x_1)^2+(x_2)^2+(x_3)^2-(x_4)^2-(x_5)^2-(x_6)^2$. Sans le dire, ni l'exprimer ainsi, puisque la théorie n'est pas encore pleinement thématifiée, il explore les liens entre le groupe de spin $Spin(3,3)$ et les groupes classiques $SO(3,3)$ et $SL(4,R)$ ⁵⁵, le groupe des matrices 4×4 à éléments réels et de déterminant $+1$. Or ce groupe agit sur des objets à quatre composantes *réelles* qui sont susceptibles de deux interprétations. D'une part, ces composantes peuvent être vues comme les coordonnées homogènes d'un point de l'espace projectif réel à trois dimensions, qui n'est autre qu'une des formes possibles de l'univers de Lemaître, mais il ne mentionne pas ce fait! D'autre part, elles peuvent être vues comme les quatre composantes d'un *spineur* réel appelé aujourd'hui « spineur de Majorana », du nom du physicien italien Ettore Majorana qui les introduisit en 1937. On comprend, dès lors, que Lemaître se soit passionné pour la théorie des spineurs. Il l'approfondit, en 1935, lors d'un séjour à la *School of Mathematics* de l'*Institute of Advanced Studies* de Princeton, où il avait été invité par Oswald Veblen.

En 1937, après avoir relu le manuscrit du livre d'Eddington *Relativity Theory of Protons and Electrons*, il écrivit un article⁵⁶ où il replace son travail de 1931 dans un contexte théorique où apparaissent explicitement, les quaternions, la notion d'algèbre de Clifford et une définition purement algébrique des spineurs. Ceux-ci y sont définis comme des éléments d'un idéal à gauche d'une algèbre de Clifford⁵⁷ qui est engendré au moyen d'un idempotent⁵⁸. On

54. G. Lemaître, « Sur l'interprétation d'Eddington de l'équation de Dirac », *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, t. LI, 1931, pp.83-93.

55. Le meilleur livre permettant d'étudier les algèbres de Clifford, les espaces de spineurs et les groupes qui leur sont associés est celui de F. Reese Harvey, *Spinors and Calibrations*, Boston, Academic Press, 1990. Cfr aussi P. Lounesto, *Clifford Algebras and Spinors*, Cambridge University Press, 1997. On a de manière précise (cfr T. Reese Harvey, *op.cit.*) : $Spin^o(3,3)/Z_2 = SL(4,R)$; $SO(3,3)$ et $SL(4,R)$ sont localement isomorphes.

56. « Sur l'interprétation d'Eddington de l'équation de Dirac », *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, t. LVII, 1937, pp.165-172.

57. Un idéal à gauche d'une algèbre A est une sous-algèbre I de A telle que $A.I=I$.

58. Un idempotent d'une algèbre A est un élément P tel que $P.P=P$.

réalisera, plus tard, que ce dernier peut être interprété d'une manière tout à fait naturelle dans le cadre de l'algèbre de Boole des propositions classiques⁵⁹.

Après la guerre, sa lecture attentive des Leçons sur la théorie des spineurs d'Elie Cartan, qu'il connaissait personnellement⁶⁰, le mena à écrire plusieurs manuscrits, encore inédits⁶¹, visant à relier les travaux d'Eddington, dont nous avons parlé ci-dessus, aux présentations des spineurs données par Elie Cartan et Claude Chevalley. Dans ces écrits, Lemaître cherche à réaliser l'unification des diverses définitions de la notion de spineur en utilisant le formalisme des opérateurs de création et d'annihilation des fermions, bien connus en théorie quantique des champs. En 1955-56, Roger Broucke, qui deviendra professeur à l'Université du Texas à Austin, écrira, sous la direction de Lemaître, un mémoire intitulé « L'invention des spineurs », dans lequel est méticuleusement établie la connexion entre le concept de spineur « des physiciens » et celle qui est en germe dans la thèse d'Elie Cartan de 1894 et dans l'un des ses articles de 1913. Pour la réalisation de ce mémoire, Lemaître incita son élève à rencontrer Jacques Tits, le père de la théorie des « immeubles » (*Tits Buildings*), qui deviendra professeur au Collège de France et qui était à l'époque à l'U.L.B.⁶² L'intérêt de Lemaître pour les spineurs ne faiblit pas. Au début des années soixante, Lemaître consacrait encore une partie importante de son cours de relativité à la théorie des spineurs⁶³. Il est intéressant de noter ici que Dirac lui-même, a prononcé le 25 avril 1968, lors de la Session plénière de l'Académie pontificale des Sciences à Rome, une conférence dédiée à l'œuvre scientifique de Georges Lemaître. Dans la version publiée une section importante est réservée aux travaux de Lemaître sur les spineurs. Dirac débute cette section est disant⁶⁴ :

-
59. B. Schmeikal, « Clifford algebra of quantum logic » in *Clifford algebras and their applications in mathematical physics. 1. Algebra and physics* (R. Ablamowicz, B. Fauser, eds), Basel, Birkhäuser, 2000, pp. 219-241.
60. Lemaître eu l'occasion de séjourner quelque temps dans la famille Cartan à Paris.
61. Ces manuscrits sont les suivants : « Spineurs et Quanta » (1955) et « Les spineurs et la physique quantique » (janvier 1956). Une édition de ces manuscrits est en cours.
62. Sur les contributions algébriques de G. Lemaître, nous renvoyons à D. Lambert, « La symétrie dans les travaux algébriques de Georges Lemaître » in *Symétries* (P. Radelet-de Grave, éd. Avec la coll. de C. Brichard), Turnhout, Brepols, 2005, Centre interfacultaire d'étude en histoire des sciences, U.C.L., *Réminiscences* 7, pp.293-309.
63. Nous remercions le Prof. Jean-Pierre Antoine de l'U.C.L. de nous avoir permis de consulter les notes du cours de relativité de Mgr Lemaître de l'année 1960-1961.
64. P.A.M. Dirac, « The scientific work of Georges Lemaître », *Commentarii*, Roma, Pontificia Academia Scientiarum, 2, n°11, p. 2.

« In 1928 I introduced a relativistic wave equation for the electron having different transformation properties from the tensor equations that had previously been confined to in relativity. Two papers of Lemaître⁶⁵ are devoted to studying these transformations properties.

There are various methods that one may use for building up the theory. Eddington had previously developed one method (...). Lemaître developed another, showing up some new transformation features of the equations ».

Il est amusant de noter que l'année 1931 est tout à fait remarquable en ce qui concerne la sphère de dimensions trois, S^3 . Cette sphère qui peut être décrite, comme nous l'avons vu, comme l'ensemble des quaternions de norme unité a beaucoup intéressé Lemaître. En effet, elle sert, en 1931, à décrire l'espace « fini et sans borne » qui intervient dans l'hypothèse de l'atome primitif. Mais cette année 1931 est aussi celle durant laquelle Hopf découvre sa célèbre « fibration »⁶⁶ ; une application, topologiquement non-triviale, qui envoie la sphère S^3 sur la sphère S^2 , et dont les « fibres », grands cercles de S^3 , ne sont autres que les trajets des rayons lumineux dans la cosmologie de Lemaître⁶⁷. Enfin, 1931 est l'année où Dirac⁶⁸ a formulé sa théorie du monopôle magnétique dont l'expression mathématique fait intervenir la sphère de dimension 3 !⁶⁹

Des Rayons cosmiques au calcul numérique

Une des conséquences de l'hypothèse de l'atome primitif est, selon Lemaître, l'existence de particules chargées, hautement énergétiques, qui ont été

65. Il s'agit des deux articles de 1931 et 1937 cités ci-dessus.

66. H. Hopf, « Über die Abbildungen der dreidimensionalen Sphäre auf die Kugelfläche », *Math. Annalen*, 104 (1931) 637.

67. En fait, ce sont aussi les fameux « cercles de Villarceau » qui s'appuient sur les tores à deux dimensions qui feuillentent la sphère à trois dimensions. Une sphère à deux dimensions peut être construite à l'aide de cercles et de deux points (les pôles). Une sphère à trois dimensions peut se construire au moyen de tores et de deux cercles. Les cercles de Villarceau sont obtenus grâce aux sections d'un tore par un plan tangent à deux « petits » cercles générateurs (*cf.* M. Berger, *Géométrie vivante : ou l'échelle de Jacob*, Cassini, 2009, « Nouvelle bibliothèque mathématique »).

68. P.A.M. Dirac, « Quantized singularities in the electromagnetic field », *Proc. R. Soc. London*, A 133 (1931) 60-72.

69. T.T. Wu, C.N. Yang, « Concept of nonintegrable phase factors and global formulation of gauge field », *Phys. Rev.*, D 12 (1975) 3845-3857 ; A. Trautman, « Solutions of the Maxwell and Yang-Mills equations associated with Hopf fiberings », *Int. J. Theor. Phys.*, 16 (1977) 561-565.

produites lors des premières désintégrations de cet atome. Nous avons vu l'influence sur Lemaître des idées de Millikan relatives aux rayons cosmiques. De manière naturelle, l'abbé identifia les produits de désintégration de l'atome primitif aux rayons cosmiques que l'on captait en haute altitude et dont on ignorait encore, au début des années trente, la nature précise et l'origine. La détection et l'étude des rayons cosmiques présentaient donc, pour lui, une importance cruciale, car il s'agissait là, selon ses propres termes, de « hiéroglyphes » qu'il fallait déchiffrer pour connaître les premiers moments de l'univers. Ce faisant, il devenait l'un des premiers physiciens proposant l'existence d'un « rayonnement fossile ».

Lemaître et son collègue du M.I.T., Manuel Sandoval Vallarta, qui était aussi dans son jury de thèse ainsi que nous l'avons dit, entreprirent d'étudier les propriétés des trajectoires des particules chargées qui interagissent avec le champ magnétique de la Terre. Pour ce faire, ils reprirent la théorie développée par Carl Störmer, de l'Université d'Oslo, pour l'étude des aurores boréales, en y ajoutant l'hypothèse d'une distribution de rayonnements isotrope à l'infini. Au M.I.T., à l'aide de la « Machine de Bush » (*differential analyser*), une machine analogique permettant d'intégrer des systèmes d'équations différentielles et d'en représenter les solutions graphiquement, ils parvinrent à dessiner et à étudier des milliers de trajectoires de rayons cosmiques.

Précisons un peu les contributions de Lemaître et de ses collaborateurs. Plaçons-nous sur la Terre en un point de latitude géomagnétique donnée et étudions-y la réception de rayons cosmiques venant de l'infini. En dessous d'une certaine énergie, aucun de ces rayons ne peut atteindre le point en question. Pour une certaine valeur limite de l'énergie, les rayons atteignent le point en suivant une seule direction : l'ouest (géomagnétique) pour les particules positives et l'est pour les particules négatives. Pour des énergies supérieures à l'énergie limite, les rayons cosmiques atteignent le point selon des directions qui se situent à l'intérieur d'un cône circulaire appelé : « cône de Störmer » (dont l'axe est dirigé vers l'ouest géomagnétique pour les particules positives). Toutes les directions d'accès des rayons cosmiques, au point considéré, sont situées à l'intérieur du cône de Störmer, mais toutes les directions intérieures à ce cône ne sont pas nécessairement des directions d'accès. Après avoir donné une explication théorique de la variation observée de l'angle solide déterminé par le cône de Störmer en fonction de la latitude géomagnétique et de l'énergie des rayons cosmiques, Lemaître et Vallarta étudièrent, de

manière détaillée, les directions permises et interdites à l'intérieur de ce cône. La forme particulière des régions comprenant les directions permises explique certaines asymétries dans la réception des rayons cosmiques. Lemaître et Vallarta, en déterminant ces régions permises, donnèrent ainsi l'explication théorique du phénomène « d'asymétrie nord-sud »⁷⁰. Tous ces travaux représentent des contributions importantes à la théorie des aurores boréales et australes. Ils apportent également des informations théoriques précieuses concernant la ceinture de Van Allen. Pour cette raison, dans les années cinquante, la NASA envisagea de financer les travaux de Lemaître. Cependant ce dernier déclina l'offre craignant peut-être de perdre sa liberté de recherche.

À Louvain, entre 1934 et 1940, le problème de Störmer mobilisa, autour de Lemaître, tout un groupe de collaborateurs : Louis Bouckaert, Odon Godart, Lucien Bossy, Tchang Yong-Li, ..., que l'on peut appeler la « première école de Lemaître ». Les représentations des trajectoires périodiques ou quasi-périodiques amena cette « première école de Louvain » à développer des techniques numériques originales. Par exemple, dès le début des années cinquante, Lemaître enseignait déjà à ses étudiants, une méthode qu'il avait trouvée dans les œuvres de Gauss (qu'il lisait dans le texte original) et qui allait devenir, la « transformée de Fourier rapide ». En 1955, un de ses élèves, René De Vogelaere donna un cours, sur cette méthode, à la *Notre Dame University (Indiana)*. L'algorithme de cette « transformée de Fourier rapide », ne fut développé explicitement, sous la forme que nous lui connaissons aujourd'hui, qu'en 1965 par James Cooley, du Centre de recherche Thomas Watson d'I.B.M. et par John Tuckey des laboratoires de *Bell Telephone*. C'est la *Theoria motus* de Gauss⁷¹ qui fournit à Lemaître, toujours dans le contexte du problème de Störmer, l'intuition de base pour la construction d'une méthode originale de résolution des équations différentielles basée sur l'itération rationnelle⁷². Remarquons au passage que Lemaître, avait été initié, très jeune, à la lecture des textes originaux des grands mathématiciens (Euclide, Euler, Gauss, Jacobi,

70. G. Lemaître, M.S. Vallarta, L. Bouckaert, « On the North-South Asymmetry of Cosmic Radiation », *The Physical Review*, t.XLVII, 1935, pp.434-436.

71. K.F. Gauss, *Theory of the Motion of the Heavenly Bodies Moving about the Sun in Conic Sections. Theoria Motus* (Ch. H. Davis, trad.), New York, Dover, 1963, pp. 167-171.

72. G. Lemaître, « L'itération rationnelle », *Bulletin de la classe des sciences de l'Académie royale de Belgique*, 5e série, t.XXVIII, 1942, pp.347-354.

Poncelet⁷³,...), par le Père Henri Bosmans dont nous avons parlé précédemment.

Peu avant sa mort, en juin 1966, le collaborateur technique de Georges Lemaître, Odon Godart, lui apprendra la découverte, faite l'année précédente par Penzias et Wilson, du rayonnement cosmologique de fond. Il en fut heureux, même si la nature de ce dernier n'était pas liée aux rayons cosmiques qu'il avait tant étudiés.

Par une sorte de retour de l'histoire, Georges Lemaître pourrait très bien ne pas avoir eu complètement tort à propos de l'origine de certains rayons cosmiques. En fait on détecte aujourd'hui un rayonnement cosmique de très haute énergie, à savoir 10^{20} eV (électron-volts) et plus⁷⁴. De tels rayonnements ne peuvent provenir ni de la galaxie, ni simplement de phénomènes se passant dans l'espace intergalactique. On peut montrer également que l'énergie des rayonnements cosmiques extragalactiques ne pourrait pas dépasser 10^{19} eV en raison d'une interaction avec les photons du rayonnement cosmologique de fond. D'où pourraient provenir ces UHECR (*Ultra-High Energy Cosmic Rays*) ? On pense aujourd'hui à des phénomènes hautement hypothétiques qui pourraient se passer dans les premiers moments de l'univers : liés à la disparition de défauts topologiques ou aux désintégrations de particules (d'énergie 10^{24} eV) prévues par une théorie fondamentale supersymétrique. Il pourrait donc y avoir bel et bien, comme le proposait Lemaître, des rayons cosmiques portant une information relative aux premiers instants de l'univers !

Un penchant pour la mécanique ! La régularisation du problème des trois corps

Lemaître appliqua, à la représentation des orbites des rayons cosmiques, des techniques issues de la mécanique céleste et en particulier des *Méthodes*

73. Le lecteur découvrira, dans ce recueil d'article, le tout dernier article de Lemaître publié après sa mort par les soins d'Odon Godart : « Le principe de continuité d'après Jean-Victor Poncelet », *Revue des Questions Scientifiques*, 138 (1967) 381-395. On y mesure la culture de Lemaître en matière d'histoire des mathématiques. Les travaux de Poncelet trouvaient régulièrement leur place dans ses cours de Louvain.

74. M. Crozon, *Quand le ciel nous bombarde. Qu'est-ce que les rayons cosmiques ?*, Paris, Vuibert, 2005 ; « Les rayons cosmiques de ultra-haute énergie » in *Panorama de la physique* (sous la dir. de G. Pietryk), Belin-Pour la Science, 2007, pp. 54-55.

*nouvelles de la mécanique céleste*⁷⁵ de Poincaré ou de la théorie de Lune de l'astronome Charles Eugène Delaunay. Certaines propriétés des solutions du problème de Störmer rappelaient celles des trajectoires du *problème des trois corps* pour lequel il s'agit de déterminer les trajectoires de trois masses en interaction gravitationnelle. Lemaître fut donc conduit naturellement à s'intéresser à ce célèbre problème de la mécanique classique. La représentation graphique des trajectoires de ce problème, pose de grandes difficultés lorsque les masses se rapprochent, comme c'est le cas pour un choc. Dans ce cas la force (inversement proportionnelle au carré de leur distance) tend en effet vers l'infini. Lemaître trouva un système de coordonnées, à partir duquel on peut effectuer, au moyen d'une transformation conforme, la « régularisation des chocs doubles », c'est-à-dire l'élimination des divergences produites par le choc de deux des trois masses⁷⁶. Lemaître continua à travailler sur le problème des trois corps jusqu'à la fin de sa vie. Sa toute dernière publication scientifique, un rapport technique publié en 1963 à la suite d'un séjour à Berkeley, est consacrée précisément à ce sujet⁷⁷. Ces travaux jouèrent un rôle clef dans l'orientation des recherches des derniers étudiants de Lemaître formant sa « deuxième école de Louvain », dont un des représentants importants est, sans nul doute, son successeur direct à la Chaire de mécanique : André Deprit, qui travaillera plus tard au *National Bureau of Standards* à Gaithersburg. Dans la leçon inaugurale de la *Chaire Monseigneur Lemaître (1972-1973)*, l'astronome français, Jean Kovalevsky, a mis en évidence les contributions essentielles et originales de Monseigneur Lemaître à la mécanique céleste qui restent encore aujourd'hui une source d'inspiration pour les chercheurs⁷⁸.

« Calculons sans fatigue »: une passion pour les machines et les « nouveaux chiffres »

Lemaître possédait une réelle passion pour le calcul numérique et pour les machines à calculer. Nous avons vu qu'il avait utilisé au M.I.T. la « ma-

75. Paris, Gauthier-Villars, 1892.

76. G. Lemaître, « Regularization of the Three-Body Problem », *Vistas in Astronomy*, t.I, 1955, pp.207-215.

77. « The three-Body Problem », Berkeley, University of California, 1963, *Space Sciences Laboratory, Technical Report Serie 4*, Issue 49.

78. J. Kovalevsky, « Problèmes de mécanique céleste » (texte de la leçon inaugurale à la Chaire Monseigneur Lemaître 1972-1973), *Revue des Questions Scientifiques*, 144, n°2, avril 1973, pp. 189-228.

chine de Bush ». Revenu à Louvain, il acquit toute une série de machines à calculer mécaniques puis électromécaniques. Sur de telles machines, il effectua, par exemple, le calcul des modes de vibration de la molécule de mono-deutéroéthylène. Il fit ce travail à la demande de son collègue physicien Charles Manneback et du groupe des chimistes de Louvain qui collaboraient, à la fin des années trente, avec Hugh S. Taylor de Princeton. En 1958, Lemaître fit venir le premier ordinateur de l'Université Catholique de Louvain, au dernier étage du vieux bâtiment du Collège des Prémontrés, situé à la rue de Namur. Il s'agissait d'une *Burroughs E101*. Cette machine, joyau de son « Laboratoire de calcul numérique », fut utilisée, par Lemaître et son assistante, Andrée Bartholomé, pour effectuer, entre autres, des calculs relatifs aux modèles mécaniques d'amas de galaxies. Lemaître les avait développés, dans les années quarante et cinquante, dans la foulée de ses travaux sur les condensations matérielles dans l'univers en expansion. Le cosmologiste de Louvain aimait programmer directement dans le langage-machine. Il s'intéressa aussi aux langages-assembleurs et aux langages évolués, l'ALGOL en particulier⁷⁹. On peut dire sans exagération qu'il fut un réel pionnier dans le domaine de l'informatique.

Sa passion pour le calcul sur machine l'amena à envisager une réforme de l'enseignement de l'arithmétique élémentaire. Selon lui, la difficulté que ressent l'enfant lorsqu'il apprend le calcul élémentaire provient du recours constant, souvent pénible, à la mémoire à court terme (pour retenir les chiffres et les reports) et à la mémoire à long terme (pour retenir les tables de multiplication). Une autre difficulté provient du fait que l'on effectue le calcul écrit dans le sens contraire à celui de l'écriture française. Pour éliminer au maximum ces difficultés, Lemaître envisageait de renoncer à l'apprentissage des tables de multiplication et proposait des techniques de calcul purement mécaniques, qui ne requièrent que peu de mémorisation. Il proposait également de disposer les calculs écrits dans un sens cohérent avec celui de l'écriture française et une nouvelle écriture des chiffres n'utilisant que quatre symboles de base représentant 1, 2, 4 et 8. Parmi les symboles proposés par Lemaître pour ses « nouveaux chiffres », certains sont inspirés directement de la notation musicale. Le cosmologiste résuma les principes de son « nouveau calcul » dans

79. À propos du début de l'histoire de l'informatique en Belgique nous renvoyons le lecteur au beau livre de Marie d'Udekem-Gevers, *La Machine mathématique IRSIA-FNRS (1946-1962)*, Bruxelles, Académie royale de Belgique, 2011.

un livre intitulé : *Calculons sans fatigue*⁸⁰. Dans les années soixante, ces nouvelles méthodes furent testées effectivement, mais avec peu de succès faut-il l'avouer, avec de jeunes élèves. Elles inspirèrent l'un des grands spécialistes belges de la « mathématique moderne », le Professeur Papy qui les intégra dans un de ses livres⁸¹. Ces recherches ont occupé l'esprit de Lemaître pendant plusieurs années. Dans les années cinquante, il en parlait souvent autour de lui⁸². Cela provoqua parfois de l'incompréhension de la part de ses proches collaborateurs, mais aujourd'hui ces travaux pourraient encore intéresser les scientifiques qui travaillent, en psychologie cognitive ou en neurophysiologie, sur nos capacités calculatoires ou sur les pathologies qui viennent les entraver⁸³.

Une pédagogie singulière

Entre 1925 et 1964, de nombreux étudiants, ingénieurs, mathématiciens ou physiciens, se sont succédés dans les amphithéâtres où enseignait Lemaître. La majorité en a retenu l'image d'un vrai scientifique pratiquant la recherche « en direct ». Mais, en même temps, la plupart de ces étudiants sont d'accord pour dire que la matière leur passait souvent « au-dessus de la tête », le chanoine, grand distrait, confondant d'ailleurs régulièrement les auditoires et donnant à l'un ce qui revenait à l'autre ! Beaucoup ont raconté l'atmosphère joyeuse et souvent bruyante de certains cours de Lemaître, lequel s'accommodait et même s'amusait de cette situation. Pour l'étudiant ordinaire, la difficulté des cours du chanoine et les écarts à la pédagogie classique étaient largement compensés par son extrême bienveillance durant les examens. Là encore l'écart à la « normalité » pédagogique était monnaie courante. Lemaître arrivait parfois en retard à un examen oral et attribuait à tous les étudiants, en guise d'excuse, une note de 13/20. Lors de son examen, comme le prouve un enregistrement d'un de ses derniers cours, l'étudiant pouvait d'ailleurs choisir une formule où il recevrait quoiqu'il fasse... 13/20. Ceci dit,

80. Louvain, E. Nauwelaerts, 1954.

81. Ce dernier écrivit un livre : *Minicomputer* (Bruxelles, Papy & IVAC, 1968) où les chiffres de Lemaître sont utilisés.

82. Le futur Prix Nobel de Chimie, Ilya Prigogine, présent au Conseil Solvay de 1958 à Bruxelles, raconte que Lemaître lui parla plus de ce sujet que de cosmologie (communication personnelle)!

83. Cfr S. Dehaene, *La Bosse des Maths*, Paris, Odile Jacob, 2010, (deuxième édition revue et complétée ; première édition, 1996).

lorsqu'on se penche sur les notes de cours de ses meilleurs étudiants, on découvre que le chanoine abordait les matières classiques avec un point de vue où affleurent incontestablement son génie, son originalité et sa culture. Le passage suivant extrait de son article revisitant l'œuvre scientifique d'Einstein, qui fut émerveillé dans son plus jeune âge par la découverte d'une boussole, en dit long sur sa conception de l'enseignement⁸⁴:

« Pourquoi n'attendrions-nous pas encore l'enfant qui s'émerveillera à nouveau devant une boussole et en tirera l'intuition du monde merveilleux de la physique, caché – bien caché, derrière les choses ; l'adolescent tressaillant d'enthousiasme en serrant dans ses mains le précieux petit livre qui lui transmet le miracle de la pensée grecque ; le collégien retournant en tous sens un paradoxe apparemment insoluble : l'étudiant dont la curiosité scientifique a survécu, ou du moins s'est réveillée après l'écrasant dressage de l'université ?

Et peut-être alors trouvera-t-il aussi les idées simples auxquelles personne ne pense ; introduira-t-il, par la libre création de son esprit, de nouveaux concepts dont il sera capable de déduire les conséquences jusqu'à leur rencontre éblouissante avec l'expérience. »

Molière et Chopin, deux compagnons d'un cosmologiste

On ne peut passer sous silence d'autres centres d'intérêt de Lemaître qui montrent qu'il n'était pas qu'un scientifique. Il était doué pour le piano et jouait admirablement Bach et Chopin. Son piano le suivit dans les différentes habitations qu'il occupa et résista au bombardement de Louvain de 1944 qui éventra son appartement de la Place Foch. À des collègues scientifiques qui lui rendaient visite, Lemaître ne se privait pas de leur offrir de temps à autre un petit concert. Hubert Reeves fut l'un de ces privilégiés lorsqu'il vint en Belgique au début des années soixante⁸⁵.

En plus de son amour pour la musique, Lemaître entretenait une passion pour la littérature et plus particulièrement pour les œuvres de Molière et de Racine. Il s'était mis en tête de prouver, dans la foulée d'une thèse souvent défendue, qu'il existait un deuxième auteur « sous » l'œuvre de Molière. Il

84. « L'œuvre scientifique d'Albert Einstein » (communication faite le 14 juin 1955 lors de la soirée organisée à l'initiative du Bureau Belge du Congrès Juif Mondial, en souvenir d'A. Einstein), *Revue des Questions Scientifiques*, 68^e année, t. CXXXVI (5^e série, t. XVI), 20 octobre 1955, pp. 486-487.

85. H. Reeves, *Je n'aurai pas le temps*, Paris, Seuil, 2008.

écrivit plusieurs manuscrits à ce sujet portant des titres amusants : « Une paire de Molière » ou « Molière, une étoile double ». Il exposa son travail lors de conférences qu'il donna à Louvain dans les années cinquante sans parvenir à vraiment convaincre ses collègues spécialistes en littérature française.

Cet intérêt n'est nullement étonnant, car la lecture des articles et ouvrages destinés à un large public cultivé montre que le chanoine manie la plume avec aisance et avec un style particulièrement agréable qui laisse entrevoir chez lui une fibre authentiquement littéraire.

Georges Lemaître et le problème des rapports entre Science et Foi

On sait que Lemaître était prêtre catholique. Jusqu'à la fin de sa vie il resta profondément fidèle à sa vocation sacerdotale. Son engagement spirituel était aussi intense que discret. Dès les années vingt, il avait rejoint un groupe de prêtres fondés par le cardinal Mercier : la « Fraternité sacerdotale des Amis de Jésus »⁸⁶. Au sein de celle-ci, des prêtres diocésains prononçaient un vœu de pauvreté et un vœu spécial d'offrande de sa personne au Christ (*votum immolationis*). Chaque jour, les prêtres des « Amis de Jésus » effectuaient une heure d'adoration, avant ou après leur Messe, et suivaient chaque année une retraite silencieuse de dix jours. Lemaître participa fidèlement à cette retraite et donna, de temps à autre, des conférences spirituelles à ses confrères. Dans ce contexte, Lemaître découvrit les écrits du Bienheureux Ruysbroeck, ce grand auteur spirituel ayant influencé profondément la mystique rhéno-flamande. Dans ses cahiers de retraite, le chanoine en retranscrit plusieurs passages dans la langue originale, le moyen-néerlandais.

Dans les années trente Lemaître s'occupa aussi des étudiants chinois de Louvain et il devint le premier directeur de la maison des étudiants chinois de Louvain. Il avait eu la chance de rencontrer, au séminaire de Malines, un étudiant chinois avec lequel il s'était lié d'amitié et qui lui avait appris quelques

86. D. Lambert, « Mgr Georges Lemaître et les 'Amis de Jésus' », *Revue Théologique de Louvain*, 27 (1996) 309-343. ; D. Lambert, « Mgr Georges Lemaître et le dialogue entre la cosmologie et la foi. I », *Revue Théologique de Louvain*, 28 (1997) 28-53. ; D. Lambert, « Mgr Georges Lemaître et le dialogue entre la cosmologie et la foi. II », *Revue Théologique de Louvain*, 28 (1997) 227-243 ; D. Lambert, « Mgr Georges Lemaître » in *Dizionario interdisciplinare di scienza e fede. Cultura scientifica, Filosofia e theologia* (A. Strumia, G. Tanzella-Nitti, eds), Roma, Urbaniana University Press, 2002, pp.1908-1917.

rudiments de la langue chinoise. De plus, un de ses collègues louvanistes n'était autre que le géologue Jacques Thoreau, beau-frère du Père Vincent Lebbe, l'« apôtre des chinois ». Lemaître devint avec Dom Théodore Nève, Abbé de l'abbaye bénédictine de Saint-André à Bruges, l'une des chevilles ouvrières de l'œuvre de Lebbe en Belgique. Jusqu'à la fin de sa vie, il garda des contacts avec ceux qui s'occupaient de la cause des chinois réfugiés dans la ville universitaire. Avant la seconde guerre plusieurs étudiants chinois, dont Tchang Yong-Li, rejoindront l'équipe de recherche de Lemaître sur les rayons cosmiques dont nous avons parlé ci-dessus.

Georges Lemaître a toujours entretenu d'excellents rapports avec l'autorité ecclésiastique, même si de temps à autre il se dispensait de l'observance de points mineurs de la discipline alors en vigueur (comme le fait de devoir porter sa soutane pour faire du sport !). En 1936, il fut créé, comme beaucoup de prêtres professeurs à Louvain, chanoine honoraire de la cathédrale Saint Rombaut. Pie XI le nomma parmi les tous premiers membres de l'Académie pontificale des Sciences⁸⁷. En 1951, le pape, sans nommer Lemaître explicitement, fit allusion à l'hypothèse de l'atome primitif dans son discours *Un'Ora*, où il entendait revisiter les voies thomistes vers l'existence de Dieu à l'aide des données des sciences⁸⁸. Ce discours indisposa beaucoup de scientifiques non-croyants et au premier chef les membres soviétiques de l'Union astronomique internationale. Le chanoine louvaniste fut également très mal à l'aise de voir son hypothèse mise ainsi en avant, craignant que cela n'augmente encore les reproches de ces personnes qui le soupçonnaient, à tort, d'avoir introduit l'hypothèse de l'atome primitif à des fins apologétiques. Pie XII, qui ne voulait pas se brouiller avec la communauté des astronomes et qui appréciait énormément le chanoine Lemaître, tint compte de son avis lorsqu'il lui demanda, en 1952, par l'intermédiaire du directeur de l'Observatoire du Vatican et de la Secrétairerie d'Etat, de ne plus faire allusion à son hypothèse de l'atome primitif dans ses discours. La raison invoquée par Lemaître fut vraisemblablement que son idée n'était pas encore étayée par des observations.

87. R. Ladous, *Des Nobel au Vatican. La fondation de l'Académie pontificale des sciences*, Paris, Cerf, 1994.

88. *Papal Adresses to the Pontifical Academy of Science 1917-2002 and to the Pontifical Academy of Social Sciences 1994-2002* (pref. N. Cabibbo ; introd. by Mgr M. Sanchez Sorondo), Pontifical Academy of Science, *Scripta Varia* 100, 2003.

En 1959, Jean XXIII fit du chanoine un « prélat domestique »⁸⁹, à l'occasion de sa nomination comme président de l'Académie pontificale des sciences. Il devint alors « Monseigneur » Lemaître. Quant à Paul VI, il lui offrit de pouvoir participer à la préparation du Concile Vatican II et lui demanda de faire partie d'une commission qui analysait les questions de démographie. Lemaître, quelque peu étonné de cette nouvelle mission s'acquitta tout de même de sa tâche en proposant à Rome un petit rapport contenant une réflexion personnelle.

Comme prêtre, Lemaître fut naturellement confronté à la question des liens entre sa science et sa foi. Sa position à ce sujet a évolué. Dans sa jeunesse, Lemaître a commencé par adopter une position concordiste comme le prouve le manuscrit « Les trois premières paroles de Dieu » auquel nous avons fait allusion ci-dessus. Mais, dès les années trente, probablement sous l'influence de la découverte du monde protestant anglo-saxon et des critiques de ceux qui soupçonnaient l'abbé d'avoir défendu son hypothèse de l'atome primitif pour des raisons apologétiques, Lemaître développa une position qui distingue résolument la science et la foi. Entre 1933 et 1936 se forge ce que l'on pourrait appeler sa thèse des « deux chemins vers la vérité ». Il y a le chemin de la découverte scientifique et celui de l'engagement de foi. Ces deux chemins progressent vers la vérité, mais ne peuvent être confondus. L'unité entre science et foi n'est pas d'abord d'ordre conceptuel, elle se constitue par le fait que c'est la même personne qui agit tantôt comme scientifique, tantôt comme croyant. À première vue, on pourrait assimiler cette position à ce que Stephen Jay Gould appelait le principe du *NOMA* (*Non Overlapping Magisteria Principle*), qui propose que les deux magistères, celui des sciences et celui de la théologie, n'empiètent pas les uns sur les autres⁹⁰. Cependant, il faut faire attention, car la posture qu'adopte Lemaître est en réalité plus proche d'une position thomiste classique que d'un « discordisme »⁹¹ qui est au fondement du principe du *NOMA*. Pour le thomisme, que Lemaître a étudié en 1919, le niveau des phénomènes de la nature a sa propre autonomie, il peut donc être étudié pour

89. Il s'agissait d'un titre honorifique conféré par le Saint-Père, le plus souvent à des prêtres occupant certains postes importants.

90. S.J. Gould, *Et Dieu dit : « Que Darwin soit ! » : science et religion, enfin la paix ?* (trad. de *Rocks of Ages: Science and Religion in the Fullness of Life* ; préface de Dominique Lecourt), Paris, Seuil, 1999, Science Ouverte.

91. Le discordisme est cette position, diamétralement opposée au concordisme, qui consiste à maintenir radicalement séparés les domaines des sciences et de la théologie.

lui-même, sans faire intervenir la philosophie ou la théologie. Mais cela ne veut pas dire que celles-ci n'ont rien à dire à propos du monde empirique. Le thomiste admet qu'une articulation entre la théologie et les sciences de la nature est possible par la médiation de la philosophie. Comme Lemaître n'était ni philosophe ni théologien de profession, il n'a jamais approfondi cette articulation, mais sa dernière interview pour Radio-Canada⁹², que l'on trouvera dans cette revue, montre bien que, chez lui, la science et la foi ne sont pas hermétiquement séparés. Pour Lemaître, comme pour Thomas d'Aquin, il est important de distinguer la « création » (relation métaphysique par laquelle Dieu soutient le monde dans son être) du « commencement » de l'univers. Le rapport entre ces deux notions ne peut être pensé que sur un plan philosophique. Georges Lemaître ne se risquera jamais à décrire et à investiguer ce rapport de manière détaillée. Dans le compte-rendu qu'il fait du livre de Paul Couderc cité plus haut, Lemaître montre néanmoins le fond philosophique thomiste qui sous-tend implicitement sa pensée :

« Est-il encore nécessaire d'insister sur le fait que les théologiens depuis Saint-Thomas sont prêts à admettre que le monde a été créé de toute éternité ? »

Bien entendu, on pourrait dire que le cosmologiste n'utilise qu'une facette de la pensée de Thomas d'Aquin. En effet, si le grand théologien admet que *logiquement* un monde créé peut très bien n'avoir jamais commencé, il admet en revanche, *théologiquement*, que⁹³ :

« (...) *quod mundum non semper fuisse sola fide tenetur et demonstrative probari non potest, sicut et supra de mysterio Trinitatis dictum est. Et huius ratio est, quia novitas mundi non potest demonstrationem recipere ex parte ipsius mundi.* ».

Quoi qu'il en soit, Lemaître maintient fermement la distance épistémologique qui distingue la *création* (au sens théologique ou métaphysique) et le *commencement naturel* de l'univers, ce dernier étant parfaitement défini, comme état initial, par la physique⁹⁴. Pour être le plus proche possible de ce que pensait Lemaître il faut, d'une part, insister sur le fait qu'il a défendu à

92. G. Lemaître, « L'expansion de l'Univers: Réponses à des questions posées par Radio-Canada le 15 avril 1966 », *Revue des Questions Scientifiques*, t. CXXXVIII (5^e série, t. XXVIII), avril 1967, n°2, pp. 153-162, version revue et adaptée par O.Godart.

93. *Summa Theologiae*, I^a, q.46, a.2.

94. G. Lemaître, « L'hypothèse de l'atome primitif » (note présentée lors de la séance du 8 février 1948), *Acta Pontificiae Academiae Scientiarum*, t. XII, 1948, n°6, pp. 25-40.

partir des années trente l'autonomie épistémologique de la cosmologie physique par rapport à la théologie. Mais il faut, d'autre part, mettre en évidence le fait qu'il a vécu personnellement et concrètement l'unité de ses deux engagements sans aucune difficulté, car au fond son bagage thomiste lui permettait de penser à la fois cette autonomie du savoir scientifique et une articulation avec la théologie sur un plan méta-scientifique. Pour le comprendre en profondeur il faut relire en parallèle les deux textes suivants. Le premier, datant de 1958, qui exprime la distance méthodologique qu'il préserve entre science et foi⁹⁵ :

« (...) C'est le fond philosophique de l'hypothèse de l'atome primitif. Personnellement j'estime qu'une telle théorie reste entièrement en dehors de toute question métaphysique ou religieuse. Elle laisse le matérialiste libre de nier tout être transcendant. Il peut prendre, pour le fond de l'espace-temps, la même attitude d'esprit qu'il a pu adopter pour les événements survenant en des endroits non singuliers de l'espace-temps. Pour le croyant, elle exclut toute tentative de familiarité avec Dieu, telle la «chiquenaude» de Laplace ou le «doigt» de Jeans. Cela s'accorde avec la parole d'Isaïe parlant du «Dieu caché⁹⁶», caché même dans le début de la création. »

et celui où, en 1966, il exprime que⁹⁷:

« La physique n'exclut pas la providence. Rien n'arrive sans son ordre ou sa permission, même si cette action suave n'a rien de miraculeux.

L'évolution, que ce soit celle de l'univers ou du monde vivant, a pu se faire au hasard des sauts quantiques ou des mutations. Néanmoins, ce hasard a pu d'un point de vue supérieur être orienté vers un but. Pour nous chrétien, il a été orienté vers l'apparition de la vie. En ce qui a été fait, il y avait de la vie, de l'intelligence et la vie était lumière chez l'homme et enfin dans l'humanité par l'incarnation de l'Homme-Dieu : la vraie lumière qui a illuminé nos ténèbres.

95. G. Lemaître, *L'Hypothèse de l'atome primitif. Essai de cosmogonie (préf. F. Gonseth), suivi de L'Hypothèse de l'atome primitif et le problème des amas de galaxies: Rapport présenté par G. Lemaître au onzième Conseil de physique de l'Institut international de physique Solvay*, juin 1958, et de O. Godart, *Georges Lemaître et son œuvre. Bibliographie des travaux de Georges Lemaître*, Bruxelles, Culture et civilisation, 1972, pp. 9-10.

96. Is 45, 15.

97. G. Lemaître, « L'expansion de l'Univers: Réponses à des questions posées par Radio-Canada le 15 avril 1966 », *Revue des Questions Scientifiques*, t. CXXXVIII (5e série, t. XXVIII), avril 1967, n°2, pp. 153-162, version revue et adaptée par O. Godart.

Le hasard n'exclut pas la Providence. Peut-être le hasard fournit-il les touches qu'actionne mystérieusement la Providence. »

Sciences et théologie sont deux approches qui possèdent leur autonomie propre, mais on voit bien que pour Lemaître, il existe un niveau « méta-physique », où elles ne peuvent être radicalement dissociées. Cependant ce niveau reste, par définition, inaccessible à toute méthodologie empirique et formelle.

Georges Lemaître et la *Société Scientifique de Bruxelles*

Les articles de Lemaître qui sont réédités ici ont tous été publiés initialement par la *Revue des Questions Scientifiques*. Cette revue, ainsi que les *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* (aujourd'hui disparues) dans lesquelles il a publié des articles majeurs, dont celui de 1927, sont des publications de la *Société Scientifique de Bruxelles*, une association de scientifiques catholiques fondée en Belgique, en 1875, par le père jésuite Ignace Carbonnelle, pour montrer qu'il n'y avait pas de discordance entre le contenu de la foi catholique et les acquis de la recherche scientifique. La devise de cette *Société* reprend d'ailleurs une phrase de la constitution *Dei Filius* du Concile Vatican I : « *nulla unquam inter fidem et rationem vera dissensio esse potest* »⁹⁸. Ces publications avaient une grande notoriété et une assez bonne diffusion du temps de Lemaître. Les grandes universités catholiques de par le monde suivaient de près les publications de la *Société Scientifique de Bruxelles* dont le secrétariat se trouvait à Louvain. On comprend donc pourquoi Lemaître trouva, dans la *Revue* et dans les *Annales*, un canal approprié et privilégié pour faire connaître ses idées. Contrairement à ce que certains auteurs ont pu parfois dire d'une manière anachronique, ces revues, dont les articles étaient écrits en français, n'étaient pas considérées comme « obscures » à l'époque de Lemaître. La preuve en est qu'Einstein lui-même avait pris connaissance de l'article de 1927, par le biais d'un de ses proches et cela l'année même de sa parution⁹⁹. Lemaître lui-même précise d'ailleurs, dans un passage de sa recension du livre de Paul Couderc dont nous avons parlé ci-dessus (passage qui a été enlevé par

98. Vatican I, Constitution dogmatique *Dei Filius*, IV.

99. G. Lemaître, « Rencontres avec A. Einstein » (texte lu à la radio nationale belge le 27 avril 1957 à l'occasion du deuxième anniversaire de la mort d'Albert Einstein), *Revue des Questions Scientifiques*, 70^e année, t. CXXIX (5^e série, t. XIX), 20 janvier 1958, n^o1, pp. 129-132.

le chanoine avant la publication)¹⁰⁰ : « Permettez-moi de mentionner ici que notre bulletin peu accessible, les *Annales de la Société scientifique* de Bruxelles, était alors publié aux Presses universitaires de France » !

Lemaître, Pascal et Teilhard de Chardin

On pose souvent la question de savoir si le chanoine Lemaître a rencontré le père Teilhard ? Les deux ecclésiastiques auraient pu se croiser à Louvain où le jésuite avait des amis, le père Charles, un théologien jésuite, ou le géologue Henry de Dorlodot¹⁰¹. Cependant les trajectoires de ces deux hommes ne se croisèrent jamais¹⁰². Lemaître n'avait pas beaucoup d'attrait pour les sciences de la vie et il ne lut aucun texte de Teilhard. Par contre, Teilhard étudia plusieurs articles du chanoine louvaniste, dont la cosmologie cadrait tout à fait avec son évolutionnisme. Le jésuite a même souligné une sorte de symétrie entre l'atome primitif, qui signe dans le passé l'état initial de l'univers, et le « point Omega » qui représente, dans le futur, le terme de son évolution¹⁰³ :

« Pareil en cela à l'Atome primitif de Lemaître, le point Oméga ainsi défini se place, à strictement parler, hors du processus expérimental qu'il vient clore : puisque pour y accéder (dans le geste même d'y accéder), nous sortons de l'espace et du temps. Cette transcendance, toutefois, ne l'empêche pas de se présenter à notre pensée scientifique comme nécessairement douée de certaines propriétés exprimables ».

Le « point Omega » est conçu comme un « foyer d'intériorisation psychique », tandis que « l'atome primitif » est perçu en tant que « foyer d'extériori-

100. Archives Lemaître, Louvain-la-Neuve, manuscrit (corrigé de la main de G. Lemaître) de : G. Lemaître, « Compte rendu de P. Couderc : « L'expansion de l'univers » (1950) », *Annales d'Astrophysique*, t. XIII, 1950, n°3, pp. 344-345.

101. Henry de Dorlodot, *Le Darwinisme au point de vue de l'orthodoxie catholique. Volume 2. L'évolution de l'Homme* (manuscrit inédit de 1921, annoté et présenté par M. Cl. Groessens, D. Lambert), Bruxelles, Mardaga, 2009 (introduction générale et biographie de H. de Dorlodot par M. Cl. Groessens et D. Lambert : « Le Darwinisme d'un chanoine », pp.13-90).

102. Lemaître et Teilhard furent tous les deux les lauréats de la « Médaille Mendel » décernée par le *Villanova College* de Pennsylvanie à l'ouest de Philadelphie, une université d'augustinien.

103. *Œuvres de Pierre Teilhard de Chardin, 8, La Place de l'homme dans la nature. Le groupe zoologique humain* (préf. J. Piveteau), Paris, Seuil, 1977 (Paris, Albin Michel, 1956), p. 167.

sation et d'expansion physiques», comme le dit Teilhard¹⁰⁴. Lorsque ce dernier dut défendre l'orthodoxie de ses travaux auprès du Général des jésuites, un belge, le père Janssens, il ne manqua pas de comparer son analyse phénoménologique du monde vivant en évolution aux descriptions que le chanoine Lemaître avait données du cosmos en expansion¹⁰⁵.

Il faut noter ici que Lemaître avait de la sympathie pour une vision évolutive de la vie. Si la biologie ne fut jamais au cœur de ses intérêts ou de ses lectures, il fut tout de même chargé, comme président de l'Académie pontificale des sciences, d'organiser, en 1961, une «Semaine d'étude sur la structure des macromolécules d'intérêt biologique», qui fut présidée par Arne Tiselius, lauréat du Prix Nobel de chimie en 1948. À cette conférence, Lemaître avait invité, entre autres, Christian de Duve, futur Prix Nobel, et Hubert Chantrenne, grand biologiste de l'Université Libre de Bruxelles. Ce dernier raconta que Lemaître lui avait assuré que nul problème philosophique ne serait discuté durant les exposés et que l'on en resterait strictement à des données et analyses scientifiques¹⁰⁶.

Si l'on devait rapprocher Lemaître d'un grand scientifique du passé, on citerait volontiers Blaise Pascal. Lemaître le cite plusieurs fois, ce qui est une exception notable dans son œuvre, car il ne fait que très rarement allusion à des auteurs philosophes ou théologiens. Il est vrai que le chanoine cite souvent Pascal pour s'en distancier. En effet, Lemaître n'apprécie pas que l'on prétende que l'homme soit perdu dans un univers infini. Pour le cosmologiste belge, qui reste en cela fidèle au refus thomiste de l'infini actuel empirique, on doit affirmer que¹⁰⁷ :

« (...) l'homme est proportionné à la nature. S'il veut connaître le tout, il est peut-être présomptueux, mais sa présomption, son audace n'est pas infinie, elle n'est pas condamnable ou absurde, elle est l'ambition normale de l'humanité. »

104. *Cœuvres de Pierre Teilhard de Chardin*, 8, *La Place de l'homme dans la nature*, op. cit., pp. 166-167.

105. «À la base de mon attitude», dans *Cœuvres de Pierre Teilhard de Chardin*, 13, *Le Cœur de la matière*, Paris, Seuil, 1976, p. 182.

106. Informations orales que nous a transmises le Professeur Chantrenne le 28 octobre 2006. Initialement Mgr Lemaître avait invité le Professeur Brachet, mais il avait décliné l'invitation ne voulant pas se rendre au Vatican !

107. G. Lemaître, « L'étrangeté de l'Univers », *La Revue Générale Belge*, t. XCVI, juin 1960, p. 11.

Mais, il n'en reste pas moins proche de Pascal par plusieurs traits de sa personnalité. Comme lui, il est extrêmement intéressé par la mécanisation du calcul. On se souvient de l'invention par Pascal d'une machine à calculer : la « Pascaline »¹⁰⁸ ! Comme lui aussi il est un physicien attentif aux résultats d'observations et soucieux non pas d'abord de grandes synthèses spéculatives mais de l'explication de phénomènes précis. Comme lui enfin, il a maintenu une distance méthodologique et pratique entre ses convictions et sa vie religieuses, d'une part, et son activité de scientifique, d'autre part. Lemaître se réfère volontiers à l'idée du « *Deus absconditus* », du « Dieu caché » qui est cher à Pascal. Un Dieu qui demeure caché sans être absent, puisque par Lui le monde reçoit son existence. Un Dieu qui ne se démontre pas par les méthodes de la science mais qui demeure très présent dans la vie de ces croyants que sont Lemaître et Pascal. Ces deux personnages ont une approche très intérieure et spirituelle de leur foi. Il suffit de se rappeler l'engagement de Lemaître dans les « Amis de Jésus » et les liens qui unissait Pascal à l'abbaye de Port-Royal. Bien entendu, le jansénisme de Pascal n'eût pas convenu au chanoine, lui qui exigeant sur le fond, n'en restait pas moins un bon vivant.

L'homme qui aurait pu décrocher le Nobel

Avec le recul des années, on ne peut qu'être admiratif devant cette œuvre scientifique remarquable dont une grande partie sert de fondement au modèle cosmologique le mieux validé par les observations les plus récentes. Georges Lemaître aurait mérité de partager le Prix Nobel de 1978 attribué à Arno Penzias et Robert Wilson pour la découverte du *rayonnement cosmologique de fond* (CMB) dont Lemaître avait eu l'intuition (même s'il s'était trompé sur sa nature) et qui constitue l'une des preuves essentielles du modèle du Big Bang. Cette année-là, il aurait eu 84 ans. Malheureusement, il est mort à Louvain en 1966 l'année qui suivit la publication des travaux de Penzias et Wilson. Si Lemaître ne reçut pas le Nobel, il fut par contre récompensé par un grand nombre de Prix prestigieux et de distinctions importantes. Citons seulement ici le Prix Francqui, qu'il reçut en mars 1934 des mains du Roi Léopold III. La candidature à ce Prix avait été proposée par Charles de la Vallée Poussin et Alexandre de Hemptinne et avait été soutenue par une démarche personnelle

108. D. Descotes, « Pascal et les nombres » in *Pascal. Le calcul et la théologie*, Les Génies de la Science, *Pour la Science*, août-novembre 2003, pp.18-23.

d'Einstein en personne. Lemaître mérite largement qu'on lui rende la place et les priorités qu'il mérite dans l'histoire de la physique contemporaine. Le présent numéro de la *Revue des Questions Scientifiques* aurait atteint son but si le lecteur qui n'en était pas encore convaincu pouvait prendre conscience de la vraie stature de ce scientifique exceptionnel et de cet homme profond plein d'humanité.

Petite bibliographie pour découvrir la vie et l'œuvre de G. Lemaître

- + O. Godart, J. Turek, « Le développement de l'hypothèse de l'atome primitif », *Revue des Questions Scientifiques*, 153 (1982) 145-171.
- + « Georges Lemaître 1894-1966. Discours prononcés lors de la cérémonie d'ouverture du symposium international organisé en l'honneur de Lemaître cinquante ans après l'initiation de sa cosmologie du Big-Bang (Louvain-la-Neuve, 10-13 octobre 1983), *Revue des Questions Scientifiques*, 155 (1984) 139-224.
- + A. Berger (ed.), *The Big Bang and Georges Lemaître (Proceedings of a Symposium in honour of G.Lemaître, Louvain-la-Neuve, Belgium, 10-13-1983)*, Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, 1984.
- + O. Godart, M. Heller, *Cosmology of Lemaître*, Tucson, Pachart Publishing House, 1985, History of Astronomy Series, 3.
- + J.-F. Stoffel (ed.), *Mgr Georges Lemaître savant et croyant (Actes du colloque tenu à Louvain-la-Neuve le 4-11-1994)*, Louvain-la-Neuve, Centre interfacultaire en histoire des sciences, 1996, Réminiscences 3.
- + *Georges Lemaître et l'Académie Royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 125-129, Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t. X.
- + H. Kragh, *Cosmology and Controversy. The Historical Development of Two Theories of the Universe*, Princeton University Press, 1996.
- + A. Friedmann, G. Lemaître, *Essais de cosmologie précédés de L'invention du Big Bang* par Jean-Pierre Luminet (textes choisis, présentés, traduits et annotés par J.-P. Luminet et A. Grib), Paris, Seuil, 1997, Sources du Savoir.
- + D. Lambert, *Un atome d'univers. La vie et l'œuvre de Georges Lemaître*, Bruxelles, Éditions Racine/Éditions Lessius, 2000 ; republié en 2011 par Lessius.
- + H. Kragh, *Matter and Spirit in the Universe. Scientific and Religious Preludes to Modern Cosmology*, London, Imperial College Press, 2004.

- + J. Farrell, *The Day Without Yesterday: Lemaître, Einstein, and the Birth of Modern Cosmology* New York, Thunder's Mouth Press, 2005.
- + D. Lambert, *Litinéraire spirituel de Georges Lemaître* suivi de « *Univers et atome* » (inédit de G. Lemaître), Bruxelles, Lessius, 2007.
- + D. Lambert, *Lemaître. Le père du Big Bang, Pour la Science*, n°30, février-avril 2007 (Les génies de la science).
- + H. Kragh, *Entropic Creation. Religious Contexts of Thermodynamics and Cosmology*, Hampshire, Ashgate, 2008.
- + D. Lambert, J. Reisse, *Charles Darwin et Georges Lemaître. Une improbable mais passionnante rencontre*, Bruxelles, Académie Royale de Belgique, Mémoire de la Classe des Sciences (3^e série, tome XXX, n°2057), 2008.
- + D. Lambert, *Le Père du Big Bang. Georges Lemaître, un génie oublié*, dossier de *Histoire du christianisme magazine*, septembre-octobre 2010.
- + Jean-François Robredo, *Les métamorphoses du ciel : de Giordano Bruno à l'abbé Lemaître*, Paris, P.U.F., 2011.

Bibliographie de Georges Lemaître¹⁰⁹

1921

- (a) «Les trois premières paroles de Dieu » in *Mgr Georges Lemaître savant et croyant. Actes du colloque tenu à Louvain-la-Neuve le 4 novembre 1994*, suivi de *La Physique d'Einstein*, texte inédit de Georges Lemaître (J.-F. Stoffel, ed.), Louvain-la-Neuve, Centre Interfacultaire en Histoire des Sciences, 1996, Réminiscences 3, pp.107-111.

1922

- (a) «La physique d'Einstein» in *Mgr Georges Lemaître, op.cit.*, pp.223-360.
 (b) «Note signalant les points du mémoire 'La physique d'Einstein' qui sont originaux en quelque manière» in *Mgr Georges Lemaître, op.cit.*, pp.20-21.

1923

- (a) «Sur une propriété des Hamiltoniens d'un multiplicateur» (note présentée par Th. De Donder lors de la séance du 4 août 1923) *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. IX, 1923, n°7-9, pp. 380-388.

109. Le signe « * » désigne une republication. Le lecteur est invité à se référer aussi à la bibliographie donnée dans : *Mgr Georges Lemaître savant et croyant. Actes du colloque tenu à Louvain-la-Neuve le 4 novembre 1994*, suivi de *La Physique d'Einstein*, texte inédit de Georges Lemaître (J.-F. Stoffel, ed.), Louvain-la-Neuve, Centre Interfacultaire en Histoire des Sciences, 1996, Réminiscences 3, pp.145-175.

(b)* «Sur une propriété des Hamiltoniens d'un multiplicateur» in *Georges Lemaître et l'Académie Royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 25-33, (Mémoire de la Classe des sciences, 3e série, t. X).

1924

(a) «The motion of a rigid solid according to the relativity principle» (communiqué, avec une brève introduction, par A.S.Eddington), *Philosophical Magazine*, t. XLVIII, juillet 1924, pp. 164-176.

1925

(a) «Note on de Sitter's universe» (résumé de la communication présentée lors de la 133^e conférence de l'American physical society tenue à Washington les 24 et 25 avril 1925), *The Physical Review*, 2^e série, t. XXV, juin 1925, n°6, p. 903.

(b)* «Note on de Sitter's universe», *Harvard College Observatory*, mars 1925, n°17, pp. 37-41.

(bbis) «Note on de Sitter's Universe», *Publications du Laboratoire d'Astronomie et de Géodésie de l'Université de Louvain* 2 (1925) 37-41.

(c) «Note on de Sitter's universe», *Journal of Mathematics and Physics*, t. IV, mai 1925, n°3, pp. 188-192.

(d) «Note on the theory of pulsating stars», *Harvard College Observatory, Circular* n°282, 10 mai 1925, 6 pages.

1926

(a) «La théorie de la relativité et l'expérience» (conférence faite à Bruxelles lors de la session du cinquantenaire de la Société scientifique, le lundi 12 avril 1926), *Revue des Questions Scientifiques*, 45^e année, t. LXXXIX (4^e série, t. IX), avril 1926, pp. 346-374.

(b)* «La théorie de la relativité et l'expérience», in *Pour découvrir ou redécouvrir Georges Lemaître : Quelques textes de Georges Lemaître parus dans cette revue* (introduction de D. Lambert), *Revue des Questions Scientifiques*, t. CLXVI, 1995, n°2, pp. 115-138.

(c) «Compte rendu de G. Juvet : «Mécanique analytique et théorie des quanta» (1926)», *Revue des Questions Scientifiques*, 45^e année, t. XC (4^e série, t. X), 20 juillet 1926, pp. 210-211.

1927

(a) «Compte rendu de F Gonseth : «Les fondements des mathématiques» (1926)», *Revue des Questions Scientifiques*, 45^e année, t. XCI (4^e série, t. XI), 20 janvier 1927, pp. 195-197.

- (b) «À propos d'une note du P. Schaffers sur la relativité» (séance du 27 janvier 1927, 2^e section), *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série B : Sciences Physiques et Naturelles, 1^{re} partie : Comptes rendus des Séances, t. XLVII, 1927, pp. 15-21.
- (c) «Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques» (séance du 25 avril 1927), *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série A : Sciences Mathématiques, 1^{re} partie : Comptes rendus des Séances, t. XLVII, 1927, pp. 49-59.
- (d)* «A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, t. XCI, mars 1931, pp. 483-490.
- (e)* «Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques», in *L'Académie pontificale des sciences en mémoire de son second président, Georges Lemaître, à l'occasion du cinquième anniversaire de sa mort*, In Civitate Vaticana, Pontificia Academia Scientiarum, 1972, pp. 87-102, *Pontificiae academiae scientiarum scripta varia*, 36.
- (f)* «Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques» in *Georges Lemaître et l'Académie Royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 11-22, Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t. X.
- (g)* «Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques», in A. Friedmann, G. Lemaître, *Essais de cosmologie*, précédés de *L'invention du Big Bang* par Jean-Pierre Luminet (textes choisis, présentés, traduits du russe et de l'anglais et annotés par J.-P. Luminet et A. Grib), Paris, Seuil, 1997, Sources du savoir, pp.286-297.
- (h) «Le mouvement varié d'un solide, d'après la théorie de la relativité» (séance du 27 octobre 1927), *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série A: Sciences Mathématiques, 1^{re} partie: Comptes rendus des Séances, t. XLVII, 1927, pp. 103-109.

1928

- (a) «Compte rendu de P. Barbarin: «La géométrie non-euclidienne» (1928)», *Revue des Questions Scientifiques*, 47^e année, t. XCIII (4^e série, t. XIII), 20 mai 1928, pp. 467-468.
- (b) «Compte rendu de J. Chazy : «La théorie de la relativité et la mécanique classique» (1928)», in *Revue des Questions Scientifiques*, 47^e année, t. XCIV (4^e série, t. XIV), 20 juillet 1928, pp. 140-142.

1929

- (a) «La grandeur de l'espace» (conférence faite le 31 janvier 1929 à l'Assemblée

générale de la Société scientifique de Bruxelles), *Revue des Questions Scientifiques*, 48^e année, t. XCV (4^e série, t. XV), 20 mars 1929, pp. 189-216.

(b)* «La grandeur de l'espace», in *L'hypothèse de l'atome primitif: Essai de cosmogonie* (préface de F. Gonseth), Neuchâtel, Éditions du Griffon, 1946, pp. 31-66, Les problèmes de la philosophie des sciences.

(c)* «La grandeur de l'espace», *Louvain*, juillet 1983, n°2, pp. 21-28.

1930

(a) «L'hypothèse de Millikan-Cameron dans un univers de rayon variable» in *Comptes rendus du Congrès national des sciences organisé par la fédération belge des sociétés scientifiques. Bruxelles, 29 Juin-2 Juillet 1930*, Bruxelles, Fédération Belge des Sociétés Scientifiques, 1930, pp.180-182.

(b) «On the random motion of material particles in the expanding universe : Explanation of a paradox», *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, t.V, 31 juillet 1930, n°200, pp. 273-274.

1931

(a) «L'indétermination de la loi de Coulomb» (séance du 29 janvier 1931, 2^e section), *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série B : *Sciences Physiques et Naturelles*, 1^{re} partie : Comptes rendus des Séances, t. LI, 1931, pp. 12-16

(b) «The expanding universe» (communiqué par A.S. Eddington), *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, t. XCI, mars 1931, n°5, pp. 490-501.

(c) «Sur l'interprétation d'Eddington de l'équation de Dirac» (séance du 22 avril 1931, 2^e section), *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série B : *Sciences Physiques et Naturelles*, 1^{re} partie : *Comptes rendus des Séances*, t. LI, 1931, pp. 83-93.

(d) «The beginning of the world from the point of view of quantum theory», *Nature*, t. CXXVII, 9 mai 1931, n°3210, p. 706 (traduction française : « L'origine du monde du point de vue de la théorie quantique» in A. Friedmann, G. Lemaître, *Essais de cosmologie*, précédés de *L'invention du Big Bang* par Jean-Pierre Luminet (textes choisis, présentés, traduits du russe et de l'anglais et annotés pr J.-P. Luminet et A. Grib), Paris, Seuil, 1997, Sources du savoir, pp.298-299).

(e) «The evolution of the universe : Contributions to a British association discussion on the évolution of the universe» (communications de J. Jeans, G. Lemaître, W. de Sitter, A. Eddington, R.A. Millikan, E.A. Milne, J.C. Smuts, E.W. Barnes et O. Lodge ; discussion tenue le 29 septembre 1931 dans la section des sciences mathématiques et physiques du colloque du centenaire de la *British association for the advancement of science*), *Nature : Supplément*, t. CXXVIII, 24 octobre 1931, n°3234, pp. 699-722 (communication de G. Lemaître, pp. 704-706).

(f)* «The evolution of the universe : Discussion», in *British association for the advancement of science : Report of the centenary meeting. London, 1931, september 23-*

30, London, Office of the British Association, 1932, pp. 573-610 (intervention de Lemaître, pp. 605-610).

(g)* «Discussion» (traduction de l'intervention de G. Lemaître) in *Discussion sur l'évolution de l'univers* (traduction et avant-propos de P. Couderc), Paris, Gauthier-Villars, 1933, pp. 15-22.

(h) «L'expansion de l'espace», *Revue des Questions Scientifiques*, 50^e année, t. C (4^e série, t. XX), 20 novembre 1931, pp. 391-410.

(i)* «Expansion» in *L'hypothèse de l'atome primitif Essai de cosmogonie* (préface de F. Gonseth), Neuchâtel, Éditions du Griffon, 1946, pp. 67-92, Les problèmes de la philosophie des sciences.

(j)* «L'expansion de l'espace» in A. Friedmann, G. Lemaître, *Essais de cosmologie*, précédés de *L'invention du Big Bang* par Jean-Pierre Luminet (textes choisis, présentés, traduits du russe et de l'anglais et annotés par J.-P. Luminet et A. Grib), Paris, Seuil, 1997, Sources du savoir, pp. 215-238.

1932

(a) «Compte rendu de J. Jeans : «Les étoiles dans leurs courses» (1932)», *Revue des Questions Scientifiques*, 51^e année, t. CII (4^e série, t. XXII), 20 juillet 1932, p. 148.

(b) «L'univers en expansion», *Publications du Laboratoire d'Astronomie et de Géodésie de l'Université de Louvain* 9 (1932) 171-205.

1933

(a) «On Compton's latitude effect of cosmic radiation» (avec M.S. Vallarta), *The Physical Review*, 2^e série, t. XMII, 15 janvier 1933, n°2, pp. 87-91.

(b) «The uncertainty of the electromagnetic field of a particle», *The Physical Review*, 2^e série, t. XLIII, 15 janvier 1933, n°2, p. 148.

(c) «Condensations sphériques dans l'univers en expansion» (note présentée par Ch. Fabry lors de la séance du 27 mars 1933), *Comptes rendus hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris*, t. CXCVI, 1933, 1^{er} semestre, n°13, pp. 903-904.

(d) «La formation des nébuleuses dans l'univers en expansion» (note présentée par Ch. Fabry lors de la séance du 10 avril 1933), *Comptes rendus hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris*, t. CXCVI, 1933, 1^{er} semestre, n°15, pp. 1085-1087.

(e) «L'univers en expansion» (séance du 3 mai 1933, 1^{re} section), *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série A : Sciences Mathématiques, t. LIII, 1933, n°2, pp. 51-85.

(f)* «L'univers en expansion», in *l'Académie pontificale des sciences en mémoire de son second président, Georges Lemaître, à l'occasion du cinquième anniversaire de sa mort*, In Civitate Vaticana, Pontificia Academia Scientiarum, 1972, pp. 107-161, *Pontificiae academiae scientiarum scripta varia*, 36.

(g)* «The Expanding Universe» (traduction anglaise de (1933e) par M.A.H. Mac

Callum), *General Relativity and Gravitation*, t. 29, 1997, n°5, pp.641-680 (présentation par A. Krasinski, « Editor's Note : The Expanding Universe », *General Relativity and Gravitation*, t. 29, 1997, n°5, pp.637-640).

(h) «The cosmical significance of the clusters of nebulae» (intervention dans la discussion sur «The expanding universe» tenue le 12 septembre devant la section A de la B.A.A.S.), dans *British Association for the Advancement of Science : Report of the annual meeting, 1933 (103rd year). Leicester, september 6-13*, London, Office of the British Association, 1933, pp. 448-449.

1934

(a) «Evolution of the expanding universe» (rapport lu devant l'Académie le 20 novembre 1933), *Proceedings of the National Academy of Sciences*, t. XX, 15 janvier 1934, n°1, pp. 12-17.

(b) «Réponse de M. le Professeur Abbé G. Lemaître» (séance du 19 avril 1934) in «Manifestation en l'honneur de M. l'Abbé Georges Lemaître, lauréat du prix Francqui 1934», *Bulletin Technique : Union des Ingénieurs sortis des Écoles Spéciales de Louvain*, 1934, numéro spécial, pp. 39-43.

(c) «Evolution in the expanding universe» (résumé de la conférence donnée le 12 février au *Armstrong College*, Newcastle-upon-Tyne), *Nature*, t. CXXXIII, 28 avril 1934, n°3365, p. 654.

(d) «Contributions à la théorie des effets de latitude et d'asymétrie des rayons cosmiques : Trajectoires infiniment voisines de l'équateur» (séance du 25 octobre 1934, 1^{re} section), *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série A : Sciences Mathématiques, t. LIV, 1934, n°3-4, pp. 162-174.

(e) «Contributions à la théorie des effets de latitude et d'asymétrie des rayons cosmiques : Trajectoires périodiques» (séance du 25 octobre 1934, 1^{re} section), *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série A : Sciences Mathématiques, t. LIV, 1934, n°3-4, pp. 194-207.

(f) «L'univers en expansion» (communication faite à la séance publique de la Classe des sciences de l'Académie royale de Belgique le 15 décembre 1934), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale des Sciences de Belgique*, 5^e série, t. XX, 1934, pp. 1182-1200.

(g)* «L'univers en expansion», *Revue des Questions Scientifiques*, 54^e année, t. CVII (4^e série, t. XXVII), mai 1935, pp. 357-375.

(h)* «Évolution» in *L'hypothèse de l'atome primitif. Essai de cosmogonie* (préface de F. Gonseth), Neuchâtel, Éditions du Griffon, 1946, pp. 93-117, Les problèmes de la philosophie des sciences.

(i)* «Évolution», *Louvain*, juillet 1983, n°2, pp. 29-33.

(j)* «L'univers en expansion», in *Georges Lemaître et l'Académie Royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie royale de Belgique, 1995, pp. 35-48, Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t. X.

1935

- (a) «On the North-South asymmetry of cosmic radiation» (avec M.S. Vallarta et L. Bouckaert), *The Physical Review*, 2^e série, t. XLVII, 15 mars 1935, n°6, pp. 434-436.
- (b) «L'expansion de l'Univers» (conférence faite le 5 décembre 1934 à la *Société astronomique de France*), *L'Astronomie : Bulletin de la Société Astronomique de France et Revue Mensuelle d'Astronomie, de Météorologie et de Physique du Globe*, t. XLIX, avril 1935, pp. 153-168.
- (c) «Comptes rendus de E. Bauer : «Critique des notions d'éther, d'espace et de temps» (1932) ; F. Perrin : «La dynamique relativiste et l'inertie de l'énergie» (1932) ; L. de Broglie : «Conséquences de la relativité dans le développement de la mécanique ondulatoire» (1932) ; G. Darmais : «La théorie einsteinienne et la gravitation» (1932) ; É. Cartan : «Le parallélisme absolu et la théorie unitaire du champ» (1932) ; P. Langevin : «La relativité : Conclusion générale» (1932), *Revue des Questions Scientifiques*, 54^e année, t. CVIII (4^e série, t. XXVIII), 20 septembre 1935, pp. 311-312.
- (d) «Compte rendu de A. Einstein : «Les fondements de la théorie de la relativité générale. Théorie unitaire de la gravitation et de l'électricité. Sur la structure cosmologique de l'espace» (1933)», *Revue des Questions Scientifiques*, 54^e année, t. CVIII (4^e série, t. XXVIII), 20 septembre 1935, p. 311.
- (e) «Compte rendu de P. Humbert: «Exercices numériques d'astronomie» (1933)», *Revue des Questions Scientifiques*, 54^e année, t. CVIII (4^e série, t. XXVIII), 20 septembre 1935, pp. 310-311.
- (f) «La expansion del universo», *Ibérica*, t. XII, 1935, pp.3-32, pp.78-80 et pp.204-207.

1936

- (a) «On the geomagnetic analysis of cosmic radiation» (avec M.S. Vallarta), *The Physical Review*, 2^e série, t. XLIX, 15 mai 1936, n°10, pp. 719-726.
- (b) « La culture catholique et les sciences positives» (séance du 10 septembre 1936) in *Actes du VI^e congrès catholique de Malines, Vol. 5, Culture intellectuelle et sens chrétien*, Bruxelles, VI^e Congrès Catholique de Malines, 1936, pp. 65-70.
- (c) «On the allowed cone of cosmic radiation» (avec M.S. Vallarta), *The Physical Review*, 2^e série, t. L, 15 septembre 1936, n°6, pp. 493-504.
- (d) «Contributions à la théorie des effets de latitude et d'asymétrie des rayons cosmiques: Calcul d'une famille d'orbites asymptotiques» (avec M.S. Vallarta), (séance du 29 octobre 1936, 1^{re} section), *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série A : Sciences Mathématiques, t. LVI, 30 décembre 1936, n°3, pp. 102-130.

1937

- (a) «Calcul des fréquences et modes de vibration de la molécule de monodeutéroéthylène» (avec Ch. Manneback et Y.L. Tchang), (séance du 15 avril 1937, 2^e section), *Annales*

de la *Société Scientifique de Bruxelles*, série I : Sciences Mathématiques et Physiques, t. LVII, 7 juin 1937, n°2, pp. 120-128.

(b) « Raman spectrum of monodeuteroethylene » (avec J.M. Delfosse, J.C. Jungers, Y.L. Tchang et Ch. Manneback), *Nature*, t. CXXXIX, 26 juin 1937, n°3530, pp. 1111-1112.

(c) « Longitude effect and the asymmetry of cosmic radiation », *Nature*, t. CXL, 3 juillet 1937, n°3531, pp. 23-24.

(d) « Sur l'interprétation d'Eddington de l'équation de Dirac » (séance du 28 octobre 1937, 1^{re} section), *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série I : Sciences Mathématiques et Physiques, t. LVII, 31 décembre 1937, n°3, pp. 165-172.

1938

(a) « Généralisation de la méthode de Hill » (avec O. Godart), (séance du 8 janvier 1938), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. XXIV, 1938, n°1, pp. 19-23.

(b)* « Généralisation de la méthode de Hill », in *Georges Lemaître et l'Académie royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 49-54, Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t. X.

(c) « Les rayons cosmiques et le champ magnétique terrestre » in *Réunion internationale de physique-chimie-biologie. Congrès du Palais de la Découverte. Paris, octobre 1937*, Paris, Hermann, 1938, pp. 165-166 (discussion pp. 166-172), Actualités scientifiques et industrielles, 720.

1939

(a) « Lord Ernest Rutherford of Nelson » (éloge prononcé le 3 décembre 1939 lors de l'inauguration de la 4^e année académique), *Acta Pontificiae Academiae Scientiarum*, t. III, 1939, n°9, pp. 93-96.

(b)* « Lord Ernest Rutherford of Nelson », in *L'Académie pontificale des sciences en mémoire de son second président, Georges Lemaître, à l'occasion du cinquième anniversaire de sa mort*, In Civitate Vaticana, Pontificia Academia Scientiarum, 1972, pp. 277-280, *Pontificiae academiae scientiarum scripta varia*, 36.

1942

(a) « L'itération rationnelle » (séance du 5 mai 1942), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. XXVIII, 1942, n°3-6, pp. 347-354.

(b)* « L'itération rationnelle » in *Georges Lemaître et l'Académie Royale de Belgique Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 55-61, Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t. X.

- (c) «Compte rendu de F. Moreau : «Éléments d'astronomie et de géodésie» (1942)», *Ciel et Terre*, t. LVIII, novembre-décembre 1942, n°11-12, p. 378.
- (d) «Intégration d'une équation différentielle par itération rationnelle» (séance du 5 décembre 1942), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. XXVIII, 1942, n°12, pp. 815-825.
- (e)* «Intégration d'une équation différentielle par itération rationnelle», in *Georges Lemaître et l'Académie Royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 63-72. Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t. X.

1943

- (a) «Champ Magnétique et rayons cosmiques» (conférence faite à la Société belge d'astronomie, de météorologie et de physique du globe le 25 octobre 1941), *Ciel et Terre*, t. LIX, janvier-février 1943, n°1-2, pp. 1-16.

1944

- (a) «Compte rendu de O. Heckmann : «Fortschritte der Astronomie», Band II : «Theorie der Kosmologie» (1942)», *Ciel et Terre*, t. LX, octobre 1944, n°10, p. 140.

1945

- (a) «Hypothèses cosmogoniques» (conférence faite à la Société royale belge des ingénieurs et des industriels tenue à Bruxelles le 10 janvier 1945), *Ciel et Terre*, t. LXI, mars-avril 1945, n°3-4, pp. 61-71.
- (b)* «Hypothèses cosmogoniques» in *L'hypothèse de l'atome primitif: Essai de cosmogonie* (préface de F. Gonseth), Neuchâtel, Éditions du Griffon, 1946, pp. 119-146, Les problèmes de la philosophie des sciences.
- (c)* «Hypothèses cosmogoniques», *Ciel et Terre*, t. CX, juillet-août 1994, n°4, pp. 105-116.
- (d) «Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944)», *Ciel et Terre*, t. LXI, mars-avril 1945, n°3-4, pp. 114-115.
- (e) «A propos de la théorie de Milne-Haldane», *Ciel et Terre*, t. LXI, juillet-août 1945, n°7-8, pp. 213-218.
- (f) «L'hypothèse de l'atome primitif» (conférence faite à la session annuelle de la Société helvétique des sciences naturelles, à Fribourg en septembre 1945), *Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles*, 1945, pp. 77-96.
- (g)* «L'hypothèse de l'atome primitif» in *L'hypothèse de l'atome primitif: Essai de cosmogonie* (préface de F. Gonseth), Neuchâtel : Éditions du Griffon, 1946, pp. 147-176, Les problèmes de la philosophie des sciences.
- (h)* «L'hypothèse de l'atome primitif» in A. Friedmann, G. Lemaître, *Essais de cosmologie*, précédés de *L'invention du Big Bang* par Jean-Pierre Luminet (textes choisis,

présentés, traduits du russe et de l'anglais et annotés par J.-P. Luminet et A. Grib), Paris, Seuil, 1997, Sources du savoir, pp.240-263.

(i) «Les variables canoniques dans le mouvement képlérien» (séance du 13 octobre 1945), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. XXXI, 1945, pp. 365-371.

(j)* « Les variables canoniques dans le mouvement képlérien», dans *Georges Lemaître et l'Académie royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 81-86, Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t. X.

(k) «Sur un cas limite du problème de Störmer» (avec L. Bossy), (séance du 13 octobre 1945), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. XXXI, 1945, pp. 357-364.

(l)* «Sur un cas limite du problème de Stormer», in *Georges Lemaître et l'Académie royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 73-79, Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t. X.

(m) «Discours du Président à l'occasion de la séance mensuelle du 26 mai 1945 de la Société belge d'astronomie, de météorologie et de physique du globe», *Ciel et Terre*, juillet-août 1945, n°7-8, p.238.

(n) «Discours du Président à l'occasion du cinquantenaire de la Société belge d'astronomie, de météorologie et de physique du globe» (séance du 27 octobre 1945 tenue au Palais des Académies), *Ciel et Terre*, 1945, mémorial, pp. 3-6.

1946

(a) « Préface » et «Éclaircissements mathématiques», in *L'hypothèse de l'atome primitif : Essai de cosmogonie* (préface de F. Gonseth), Neuchâtel, Éditions du Griffon, 1946, pp. 7-23 et pp. 179-201, Les problèmes de la philosophie des sciences.

(b)* *L'hypothèse de l'atome primitif : Essai de cosmogonie* (préface de F. Gonseth), Neuchâtel, Éditions du Griffon, 1946, 201 pages, Les problèmes de la philosophie des sciences.

(c)* *Cosmogonia : La hipótesis del átomo primitivo* (prólogo de F. Gonseth), Buenos Aires, Ibero-Americana, 1946, 189 pages, Ciencia y tecnica, série 2, vol. 3.

(d)* *The primeval atom : A hypothesis of the origin of the universe* (translated by B.H. Korff and S.A. Korff, with an introduction by H.N. Russell), New York-London, Van Nostrand Company, 1950, IX, 186 pages.

(e)* *L'hypothèse de l'atome primitif : Essai de cosmogonie* (préface de F. Gonseth), suivi de *L'hypothèse de l'atome primitif et le problème des amas de galaxies : Rapport présenté par G. Lemaître au onzième Conseil de physique de l'Institut international de physique Solvay, juin 1958*, et de *Georges Lemaître et son œuvre. Bibliographie des travaux de Georges Lemaître* par O. Godart, Bruxelles, Éditions Culture et Civilisation, 1972, 203 pages + 99 pages de supplément, Epistèmè.

(f) «Un modèle de nébuleuse» (séance du 9 mai 1946), *Annales de la Société Scientifique*

de Bruxelles, série I : Sciences Mathématiques, Physiques et Astronomiques, t. LX, 31 juillet 1946, n°3, pp. 103-114.

1947

- (a) «Interpolation dans la méthode de Runge-Kutta» (séance du 24 avril 1947, 1^{re} section), *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série I : Sciences Mathématiques, Astronomiques et Physiques, t. LXI, 2 juin 1947, n°2, pp. 106-111.
- (b) «Calcul des intégrales elliptiques» (séance du 6 mai 1947), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. XXXIII, 1947, pp. 200-211.
- (c)* « Calcul des intégrales elliptiques», in *Georges Lemaître et l'Académie Royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 87-99, Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t. X.

1948

- (a) «L'hypothèse de l'atome primitif» (note présentée lors de la séance du 8 février 1948), *Acta Pontificiae Academiae Scientiarum*, t. XII, 1948, n°6, pp. 25-40.
- (b)* « L'hypothèse de l'atome primitif», *Revue des Questions Scientifiques*, 61^e année, t. CXIX (5^e série, t. IX), 20 juillet 1948, pp. 321-339.
- (c)* «L'hypothèse de l'atome primitif», in *L'Académie pontificale des sciences en mémoire de son second président, Georges Lemaître, à l'occasion du cinquième anniversaire de sa mort*, In Civitate Vaticana, Pontificia Academia Scientiarum, 1972, pp.163-181, *Pontificiae academiae scientiarum scripta varia*, 36.
- (d) «Quaternions et espace elliptique» (note présentée lors de la séance du 8 février 1948), *Acta Pontificiae Academiae Scientiarum*, t. XII, 1948, n°8, pp. 57-78.
- (e)* «Quaternions et espace elliptique», in *L'Académie pontificale des sciences en mémoire de son second président, Georges Lemaître, à l'occasion du cinquième anniversaire de sa mort*, In Civitate Vaticana, Pontificia Academia Scientiarum, 1972, pp. 183-206, *Pontificiae academiae scientiarum scripta varia* 36.
- (f) *L'hypothèse de l'atome primitif* (conférence faite au Palais de la Découverte le 13 mai 1947), Alençon, Maison Poulet-Malassis, 1948, 15 pages, Les conférences du Palais de la Découverte.
- (g) «M. le Chanoine Z.E.H. Kanunnik René De Muynck. Discours prononcé aux funérailles célébrées à Louvain le 19 juin 1948», *Annales de l'Université Catholique de Louvain*, 1948, pp. 269-271.
- (h) «Modèles mécaniques d'amas de nébuleuses» (séance du 3 juillet 1948), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. XXXIV, 1948, pp. 551-565.
- (i)* «Modèles mécaniques d'amas de nébuleuses», in *Georges Lemaître et l'Académie royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-

Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 101-114, Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t. X.

(j) «Modèles de nébuleuses à vitesses radiales» (avec R. Vander Borgh), (séance du 11 décembre 1948), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. XXXIV, 1948, pp. 955-965.

(k)* «Modèles de nébuleuses à vitesses radiales», dans *Georges Lemaître et l'Académie Royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 115-124, Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t. X.

1949

(a) «Rayons cosmiques et cosmologie» (conférence faite à la Société d'astronomie d'Anvers le 14 janvier 1949), *Gazette Astronomique* (Anvers), t. XXXI, 1949, pp. 1-14.

(b) *Rayons cosmiques et cosmologie*, Louvain, E. Nauwelaerts, 1949, 37 pages.

(c) «Application des méthodes de la mécanique céleste au problème de Störmer» (séance du 5 mai 1949, 1^{re} section), *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série I : Sciences Mathématiques, Astronomiques et Physiques, t. LXIII, 18 juin 1949, n^o 2, pp. 83-97.

(d) «Cosmological application of relativity», in *Reviews of Modern Physics*, t. XXI, juillet 1949, n^o 3, pp. 357-366, Numéro spécial «In commemoration of the seventieth birthday of Albert Einstein, march fourteenth 1949».

(e) «L'énigme de l'hydrogène» (conférence prononcée à la séance publique du 16 décembre 1949), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. XXXV, 1949, pp. 1158-1163.

(f)* «L'énigme de l'hydrogène», in *Georges Lemaître et l'Académie Royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 125-129, Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t. X.

(g) «The cosmological constant», in *Albert Einstein : Philosopher-scientist* (P.A. Schilpp ed.), Evanston (Ill.), The Library of Living Philosophers, 1949, pp. 439-456, The library of living philosophers 7.

(h)* «Die Kosmologische Konstante», in *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher* (Herausgegeben von P.A. Schilpp), Stuttgart, W. Kohlhammer Verlag, 1955, pp. 312-327, Philosophen des 20. Jahrhunderts.

1950

(a) «Application des méthodes de la mécanique céleste au problème de Störmer» (séance du 27 avril 1950, 2^e section), *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série I : Sciences Mathématiques, Astronomiques et Physiques, t. LXIV, 22 juin 1950, n^o 1-2, pp. 76-82.

- (b) «Compte rendu de P. Couderc : «L'expansion de l'univers» (1950)», *Annales d'Astrophysique*, t. XIII, 1950, n°3, pp. 344-345.
- (c) *L'univers*, Louvain, E. Nauwelaerts, 1950, 72 pages, Causeries de l'Université radiophonique internationale, Paris, 1950.
- (d) «Laplace et la mécanique céleste» (conférence donnée le 6 novembre 1949 sous l'égide de la Société astronomique de France), *L'Astronomie*, t. LXIV, 1950, pp. 23-31.

1951

- (a) «Modèles mécaniques d'amas de nébuleuses» (séance du 7 avril 1951), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. XXXVII, 1951, pp. 291-306.
- (b)* «Modèles mécaniques d'amas de nébuleuses», in *Georges Lemaître et l'Académie Royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 131-146, Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t. X.

1952

- (a) «Clusters of nebulae in an expanding universe», *Monthly Notes of the Astronomical Society of South Africa*, t. XI, 1952, pp. 110-117.
- (b) «Coordonnées symétriques dans le problème des trois corps (I)» (séance du 7 juin 1952), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. XXXVIII, 1952, pp. 582-592.
- (c)* «Coordonnées symétriques dans le problème des trois corps», in *Georges Lemaître et l'Académie Royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 147-158, Mémoire de la Classe des sciences 3^e série, t.X.
- (d) «The clusters of nebulae in the expanding universe» (communication lue en juillet 1952 devant la section A de la *South african association for the advancement of science* à Cape Town), *South African Journal of Science*, t. XLIX, octobre-novembre 1952, n°3-4, pp. 80-86.
- (e) «Coordonnées symétriques dans le problème des trois corps (II)» (séance du 13 décembre 1952), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. XXXVIII, 1952, pp. 1218-1234.
- (f)* «Coordonnées symétriques dans le problème des trois corps», in *Georges Lemaître et l'Académie Royale de Belgique Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 159-175, Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t.X.

1954

- (a) *Calculons sans fatigue*, Louvain, E. Nauwelaerts, 1954, 41 pages.

- (b) «Comment calculer ?» (séance du 3 juillet 1954), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. XL, 1954, pp. 683-691.
- (c)* «Comment calculer ?», in *Georges Lemaître et l'Académie royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 177-184, Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t. X.
- (d) «Régularisation dans le problème des trois corps» (séance du 3 août 1954), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. XL, 1954, pp. 759-767.
- (e)* «Régularisation dans le problème des trois corps», dans *Georges Lemaître et l'Académie royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp. 185-194, Mémoire de la Classe des sciences 3^e série, t. X.

1955

- (a) «Réunion intime en l'honneur du Chanoine G. Lemaître à l'occasion de la remise de son buste à la Classe : Réponse du Chanoine Lemaître» (séance du 5 février 1955), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. LXI, 1955, p. 77.
- (b) «Pourquoi de nouveaux chiffres?», *Revue des Questions Scientifiques*, 68^e année, t. CXXXVI, (5^e série, t. XVI), 20 juillet 1955, pp. 379-398.
- (c)* «Pourquoi de nouveaux chiffres?», in *Pour découvrir ou redécouvrir Georges Lemaître : Quelques textes de Georges Lemaître parus dans cette revue* (introduction de D. Lambert), *Revue des Questions Scientifiques*, t. CLXVI, 1995, n^o2, pp. 139-158.
- (d) «Compte rendu de H. Bondi: «Cosmology» (1952)», *Revue des Questions Scientifiques*, 68^e année, t. CXXXVI (5^e série, t. XVI), 1955, p. 584.
- (e) «Compte rendu de C. Payne-Gaposchkin : «Introduction to astronomy» (1954)», *Revue des Questions Scientifiques*, 68^e année, t. CXXXVI (5^e série, t. XVI), 1955, p. 584.
- (f) «Compte rendu de E.A. Milne : «Modern cosmology and the christian idea of God» (1952) », *Revue des Questions Scientifiques*, 68^e année, t. CXXXVI, (5^e série, t. XVI), 1955, p. 585.
- (g) «Compte rendu de E. Whittaker : «Eddington's philosophy of science» (1951)», *Revue des Questions Scientifiques*, 68^e année, t. CXXXVI (5^e série, t. XVI), 1955, p. 585.
- (h) «L'œuvre scientifique d'Albert Einstein» (communication faite le 14 juin 1955 lors de la soirée organisée à l'initiative du Bureau Belge du Congrès Juif Mondial, en souvenir d'A. Einstein), *Revue des Questions Scientifiques*, 68^e année, t. CXXXVI (5^e série, t. XVI), 20 octobre 1955, pp. 475-487.
- (i) «Regularization of the three-body problem», *Vistas in Astronomy*, t.I, 1955, pp. 207-215.
- (j)* «Regularization of the three-body problem», *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, special supplement, 1955, pp. 207-215.

1956

- (a) «Intégration par analyse harmonique» (séance du 19 avril 1956, 1^e section), *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série I : Sciences Mathématiques, Astronomiques et Physiques, t. LXX, 17 août 1956, n^o2, pp. 117-123.
- (b) «Le calcul élémentaire» (séance du 8 décembre 1956), *Bulletin de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique*, 5^e série, t. XLII, 1956, pp. 1140-1145.
- (c)* «Le calcul élémentaire», in *Georges Lemaître et l'Académie Royale de Belgique : Œuvres choisies et notice biographique* (avant-propos de Ph. Roberts-Jones), Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 1995, pp.195-200, Mémoire de la Classe des sciences, 3^e série, t. X.

1958

- (a) «Instability in the expanding universe and its astronomical implications» in *Semaine d'étude sur le problème des populations stellaires : Rome, 20-28 mai 1957*, In Civitate Vaticana, Pontificia Academia Scientiarum, 1958, pp. 475-486, *Pontificiae academiae scientiarum scripta varia*, 16.
- (b)* «Instability in the expanding universe and its astronomical implications» in *Stellar populations : Proceedings of the conference sponsored by the Pontifical academy of science and the Vatican observatory, may 20-28, 1957* (D.J.K. O'Connell, ed.), Città del Vaticano, Specola Vaticana, 1958, pp. 475-486, *Ricerche astronomiche*, 5.
- (c)* «Instability in the expanding universe and its astronomical implications», in *L'Académie pontificale des sciences en mémoire de son second président, Georges Lemaître, à l'occasion du cinquième anniversaire de sa mort*, In Civitate Vaticana, Pontificia Academia Scientiarum, 1972, pp. 207-219, *Pontificiae academiae scientiarum. scripta varia*, 36.
- (d) «Rencontres avec A. Einstein» (texte lu à la radio nationale belge le 27 avril 1957 à l'occasion du deuxième anniversaire de la mort d'Albert Einstein), *Revue des Questions Scientifiques*, 70^e année, t. CXXIX (5^e série, t. XIX), 20 janvier 1958, n^o1, pp. 129-132.
- (e)* «Rencontres avec A. Einstein» in *Pour découvrir ou redécouvrir Georges Lemaître : Quelques textes de Georges Lemaître parus dans cette revue* (introduction de D. Lambert), *Revue des Questions Scientifiques*, t. CLXVI, 1995, n^o2, pp. 159-164.
- (f) «The primeval atom hypothesis and the problem of the clusters of galaxies», in *La structure et l'évolution de l'univers Rapports et discussions. Onzième Conseil de physique tenu à l'Université de Bruxelles du 9 au 13 Juin 1958*, Bruxelles, R. Stoops, 1958, pp. 1-25 (discussion : pp. 26-31).
- (g)* «L'hypothèse de l'atome primitif et le problème des amas de galaxies : Rapport présenté par G. Lemaître au onzième conseil de physique de l'Institut international de physique Solvay, juin 1958», in (1946e), pp. 1-35 (supplément).
- (h) « Contribution au problème des amas de galaxies » (avec A. Bartholomé), (séance du 30 octobre 1958, 1^{re} section), *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série I :

Sciences Mathématiques, Astronomiques et Physiques, t. LXXII, 20 décembre 1958, n°3, pp. 97-102.

1960

- (a) «L'étrangeté de l'Univers» (conférence donnée le 8 avril), in *La scuola in Azione*, Varese, Multa Paucis, 1960, pp. 3-22, Notiziario per gli allievi, 15.
 (b)* «L'étrangeté de l'Univers», *La Revue Générale Belge*, t. XCVI, juin 1960, pp. 1-14.
 (c)* «L'étrangeté de l'univers», in *Un nouveau système de chiffres et autres essais* (avant-propos de M. Boldrini), Varese, Multa Paucis, 1961, pp. 27-41, Scuola di studi superiori sugli idrocarburi dell' Ente nazionale idrocarburi. Quaderni, 10.

1961

- (a) «Remarques sur certaines méthodes d'intégration des systèmes d'équations différentielles», in *Colloque sur l'analyse numérique tenu à Mons les 22, 23 et 24 mars 1961*, Paris/Louvain, Librairie Gauthier-Villars/Librairie Universitaire, 1961, pp. 9-23, Centre belge de recherches mathématiques.
 (b) «Un nouveau système de chiffres», in *Un nouveau système de chiffres et autres essais* (avant-propos de M. Boldrini), Varese, Multa Paucis, 1961, pp. 11-26, Scuola di studi superiori sugli idrocarburi dell' Ente nazionale idrocarburi, Quaderni 10.
 (c)* «Un nouveau système de chiffres», in *L'Académie pontificale des sciences en mémoire de son second président, Georges Lemaître, à l'occasion du cinquième anniversaire de sa mort*, In Civitate Vaticana, Pontificia Academia Scientiarum, 1972, pp. 257-273, *Pontificiae academiae scientiarum scripta varia*, 36.
 (d) «Les rayons cosmiques», in *Un nouveau système de chiffres et autres essais* (avant-propos de M. Boldrini), Varese, Multa Paucis, 1961, pp. 43-57, Scuola di studi superiori sugli idrocarburi dell' Ente nazionale idrocarburi. Quaderni, 10.
 (e) «Exchange of galaxies between clusters and field», *The Astronomical Journal*, t. LXVI, décembre 1961, n°10, pp. 603-606.

1962

- (a) «Nim ou Pythagore?» (conférence prononcée le 26 juin 1962 devant la Chambre de commerce de la Belgique et du Luxembourg au Canada), *Chamber of Commerce for Belgium and Luxembourg in Canada*, 1962, n°11-12, pp. 5-8.
 (b) «Charles Jean de la Vallée Poussin» (éloge prononcé le 4 octobre 1962 lors de la session plénière de l'Académie pontificale des sciences), *Pontificiae Academiae Scientiarum Commentarii*, t.I, 1962, n°8, pp. 1-4.
 (c)* «Charles Jean de la Vallée Poussin», in *L'Académie pontificale des sciences en mémoire de son second président, Georges Lemaître, à l'occasion du cinquième anniversaire de sa mort*, In Civitate Vaticana, Pontificia Academia Scientiarum, 1972, pp. 281-284, *Pontificiae academiae scientiarum scripta varia*, 36.

1963

- (a) «Howard Percy Robertson (1903-1961)», dans *The American philosophical Society : Year book 1962 (January 1, 1962-december 31, 1962)*, Philadelphia, The American Philosophical Society, 1963, pp. 164-168.
- (b) *The three-body problem*, Berkeley, University of California, 1963, 40 pages, *Space sciences laboratory, Technical report series*, 4, issue 49.

1964

- (a) *Code machine symbolique pour calculatrice NCR-Elliott 802*, Louvain, Laboratoire de Recherches Numériques, mai 1965, 25 pages.
- (b) *Emploi des routines classiques dans le code machine symbolique pour calculatrice NCR-Elliott 802*, Louvain, Laboratoire de Recherches Numériques, 1965, 29 pages.

Publications posthumes**1967**

- (a) «A.V. Douglas», *Journal of the Royal Astronomical Society of*, t.LXI, 1967, pp. 77-80.
- (b) «L'expansion de l'Univers: Réponses à des questions posées par Radio-Canada le 15 avril 1966», *Revue des Questions Scientifiques*, t. CXXXVIII (5^e série, t. XXVIII), avril 1967, n^o2, pp. 153-162, version revue et adaptée par O. Godart.
- (c) «L'expansion de l'univers», in *Pour découvrir ou redécouvrir Georges Lemaître. Quelques textes de Georges Lemaître parus dans cette revue* (introduction de D. Lambert), *Revue des Questions Scientifiques*, t. CLXVI, 1995, n^o2, pp. 165-174.
- (d) «Le principe de continuité d'après Jean-Victor Poncelet», *Revue des Questions Scientifiques*, t. CXXXVIII (5^e série, t. XXVIII), juillet 1967, n^o3, pp. 381-395.
- (e)* «Le principe de continuité d'après Jean-Victor Poncelet», in *Pour découvrir ou redécouvrir Georges Lemaître. Quelques textes de Georges Lemaître parus dans cette revue* (introduction de D. Lambert), *Revue des Questions Scientifiques*, t. CLXVI, 1995, n^o2, pp. 175-224.

1972

- (a) «L'étrangeté de l'univers» (conférence faite au Circolo di Roma le 8 janvier 1960), in *L'Académie pontificale des sciences en mémoire de son second président, Georges Lemaître, à l'occasion du cinquième anniversaire de sa mort*, In Civitate Vaticana, Pontificia Academia Scientiarum, 1972, pp. 239-254, *Pontificiae academiae scientiarum scripta varia*, 36.

(b) «Les rayons cosmiques et l'univers» (conférence faite à l'Université grégorienne le 14 février 1961), in *L'Académie pontificale des sciences en mémoire de son second président, Georges Lemaître, à l'occasion du cinquième anniversaire de sa mort*, In Civitate Vaticana, Pontificia Academia Scientiarum, 1972, pp. 223-237, *Pontificiae academiae scientiarum scripta varia*, 36.

1978

(a) *Un travail inconnu de Georges Lemaître: «L'Univers, problème accessible à la science humaine»* (texte d'une conférence donnée par Lemaître à l'Institut catholique de Paris, rédigé vers 1950, présentation par O. Godart et M. Heller), *Revue d'Histoire des Sciences*, t. XXXI, octobre 1978, n°4, pp. 345-359.

1985

(a) *The expanding universe : Lemaitre's unknown manuscript* (introduction by O. Godart and M. Heller), Tucson (Arizona), Pachart Publishing House, 1985, 50 pages, History of astronomy series, 2.

