

# CAHIERS FRANÇOIS VIÈTE

Série I – N°9-10

2005

## *Les sciences des causes passées*

- GABRIEL GOHAU et STÉPHANE TIRARD - *Les Sciences des causes passées...*  
PATRICE BAILHACHE - *Sciences historiques et classification des sciences*  
MARIE THÉBAUD-SORGER - *L'historien et les archives. L'histoire : vestiges et pratiques*  
GERHARDT STENGER - *Matière et vie chez Diderot et Voltaire*  
GABRIEL GOHAU - *La géologie, première science historique ?*  
JEAN GAUDANT - *Des jeux de la Nature aux médailles de la Création*  
STÉPHANE TIRARD - *L'histoire du commencement de la vie à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle*  
CLAUDE BLANCKAERT - *Pour une paléontologie de l'histoire. L'ethnologie anglaise à l'âge romantique*  
GABRIEL GOHAU et STÉPHANE TIRARD - *Intermède : le temps de quelques questions*  
MARC LACHIEZE-REY - *Historicité de la cosmologie*  
ÉTIENNE KLEIN - *Faut-il distinguer cours du temps et flèche du temps ?*  
JACQUES REISSE - *La prise en compte du temps en chimie*  
CLAUDE BABIN - *Stratigraphie et biomarqueurs*  
CLAIRE SALOMON-BAYET - *Post-face*

Centre François Viète  
Épistémologie, histoire des sciences et des techniques  
Université de Nantes

## SOMMAIRE

- GABRIEL GOHAU et STÉPHANE TIRARD ..... 5  
*Les Sciences des causes passées...*
- PATRICE BAILHACHE ..... 9  
*Sciences historiques et classification des sciences*
- MARIE THÉBAUD-SORGER ..... 33  
*L'historien et les archives. L'histoire : vestiges et pratiques*
- GERHARDT STENGER ..... 53  
*Matière et vie chez Diderot et Voltaire*
- GABRIEL GOHAU ..... 67  
*La géologie, première science historique ?*
- JEAN GAUDANT ..... 83  
*Des jeux de la Nature aux médailles de la Création*
- STÉPHANE TIRARD ..... 105  
*L'histoire du commencement de la vie à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle*
- CLAUDE BLANCKAERT ..... 119  
*Pour une paléontologie de l'histoire. L'ethnologie anglaise à l'âge romantique*
- GABRIEL GOHAU et STÉPHANE TIRARD ..... 135  
*Intermède : le temps de quelques questions*
- MARC LACHIEZE-REY ..... 139  
*Historicité de la cosmologie*
- ÉTIENNE KLEIN ..... 151  
*Faut-il distinguer cours du temps et flèche du temps ?*
- JACQUES REISSE ..... 159  
*La prise en compte du temps en chimie*
- CLAUDE BABIN ..... 175  
*Stratigraphie et biomarqueurs*
- CLAIRE SALOMON-BAYET ..... 189  
*Post-face*

## HISTORICITE DE LA COSMOLOGIE

Marc LACHIÈZE-REY\*

### Résumé

Les différents types d'observations qui ont confirmé les modèles de big bang ont fait de la cosmologie une science d'observation « de précision ».

Dans la mesure où elle permet de reconstituer une évolution de l'univers, dont les péripéties s'enchaînent jusqu'à aujourd'hui, on la qualifiera volontiers de " science historique ". J'essaierai ici de montrer comment on peut justifier cette appellation, à la lumière du déterminisme et de l'imprédictibilité de la physique.

La plupart des cosmogonies antiques font surgir un paradoxe. D'une part, elles supposent le monde *sans histoire* : il a été et subsistera toujours identique à lui-même, tel qu'il a été créé. D'autre part, elles évoquent un très bref processus de *création* d'où il serait issu, en général daté dans le passé et attribué à un Principe créateur. En Occident, le récit biblique de la Genèse (création en 7 jours) est resté jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle à la base de la cosmogonie. À partir de cette époque, les visions mécanistes qui se sont mises en place ont progressivement introduit la notion d'évolution graduelle, plutôt que de création, pour différents systèmes.

Il fut d'abord découvert que les planètes, les étoiles, les espèces vivantes, et probablement l'humanité elle-même, pouvaient naître, vivre, mourir. Mais la cosmologie restait indemne d'une telle historicisation. Cette ultime étape fut franchie dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, par les modèles de big bang, qui décrivent une véritable évolution de l'univers. Cette *histoire cosmique* concerne la géométrie de l'espace-temps en même temps que son contenu matériel. Elle peut être caractérisée comme une émergence progressive de la complexité si bien que, dans notre cosmos, la genèse est perpétuellement à l'oeuvre.

---

\* Directeur de recherches au CNRS (Astroparticule et Cosmologie, UMR 7164)

Tout en prenant le relais des récits mythiques (dès l'Antiquité grecque), la science a longtemps conservé la conception d'un univers éternellement égal à lui-même. Même les conceptions « modernes », issues des travaux de Newton, envisageaient un univers sans histoire, hormis sa très brève création dans un passé reculé. Il est tout à fait frappant que Newton, mettant en place le cadre scientifique de cette cosmologie sans histoire, se soit en même temps intéressé à la création, mais d'un point de vue théologique.

La vision scientifique et mécaniste du monde qui se développe alors ambitionne de ramener l'ensemble des phénomènes à des combinaisons de processus physiques. Au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, c'est d'abord à propos de la Terre que le récit biblique littéral est contesté. Après Benoît de Maillet, qui soutient que la Terre est âgée de plusieurs millions d'années, Buffon [*Suppléments à l'Histoire Naturelle*, Tome 2, 1775] suggère, preuves à l'appui, une Terre âgée de 74 832 ans. Le XIX<sup>e</sup> siècle confirme de plus en plus l'idée d'une Terre âgée : physique, géophysique, paléontologie, suggèrent de plus en plus fortement une longue histoire pour notre planète, qui ne coïncide pas avec celle de l'humanité. La Terre gagne son historicité, bientôt étendue au Système Solaire. Celle de l'univers viendra plus tard.

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, la conception de l'univers reste *grosso modo* celle de Newton : un cadre géométrique fixe et inaltérable – l'espace et le temps – rempli d'un contenu matériel qui n'évolue pas à l'échelle globale. Cela n'exclut pas que, localement, chaque système comme la Terre ou le Système Solaire, déroule sa propre histoire. Mais l'univers, dans sa globalité, reste sans histoire. Les débats portent surtout sur son extension spatiale : est-il limité à la centaine de milliards d'étoiles qui constitue notre galaxie, ou s'étend-il bien au-delà ? Peut-être jusqu'à l'infini ? Après des décennies de controverses, l'astronome américain Edwin Hubble montre (1924) que notre galaxie ne représente qu'une infime « molécule » d'un gaz cosmique qui s'étend démesurément loin. Le changement d'échelle impliqué par cette découverte fondamentale constitue le premier pilier de la cosmologie moderne.

Pourtant, Hubble lui-même, tout comme Einstein en Europe, qui vient de fonder la cosmologie relativiste (1917), restent partisans d'un univers sans évolution, toujours égal à lui-même, statique. À vrai dire ils ne se posent même pas la question de savoir s'il pourrait en être autrement.

À la même époque, d'autres résultats d'observation viennent bouleverser cette conception. Les mesures de l'astronome Vesto Slipher, relayé par Hubble, mènent le physicien belge Georges Lemaître à conclure que l'univers est en expansion. L'idée repose sur les résultats d'observation, mais Lemaître a montré qu'elle découle en fait de la relativité générale, récemment découverte et publiée par Einstein (1916). Au début des années 1930, la communauté scientifique reconnaît l'expansion cosmique.

Ce n'est encore qu'un premier pas vers une cosmologie véritablement évolutionniste. Le second sera accompli par Lemaître également, selon son idée de l'« atome primordial », qui préfigure les modèles de big bang. L'univers gagne un degré d'historicité dans la mesure où toutes ses caractéristiques (pas seulement géométriques) changent avec le temps : le contenu matériel et la nature des espèces en présence, particules élémentaires, noyaux, atomes, molécules ; leurs propriétés physiques : température, densité, pression ; leur organisation en systèmes plus ou moins structurés (étoiles, planètes, galaxies)...

Un raisonnement logique implacable fait découler de l'idée d'expansion celle d'une évolution du contenu de l'univers. C'est l'essence même des modèles de big bang (qui forment une vaste famille). Vers les années 1960, il devint clair, au vu de nombreux résultats astrophysiques, que ces derniers étaient compatibles avec les observations astronomiques. Hormis de rares irréductibles, la communauté scientifique dans son ensemble les reconnaît comme les seuls capables de décrire notre Univers.

### **Les modèles de big bang**

Les idées qui les sous-tendent sont très simples : l'expansion de l'univers dilue la matière qu'il contient. En se diluant, cette matière se refroidit, conformément aux lois thermodynamiques. L'univers était donc auparavant plus dense et plus chaud, d'autant plus que l'on remonte loin dans le passé. Ainsi se met en place l'histoire cosmique.

Les calculs de relativité générale (de cosmologie relativiste) d'une part, les observations astronomiques d'autre part, permettent d'estimer les taux d'expansion (constante de Hubble), de dilution et de refroidissement. Tout concorde pour nous indiquer que, il y a environ 14 milliards d'années, l'univers était extrêmement « petit », dense et chaud. Pour fixer les choses, les astrophysiciens s'intéressent à une période précise de l'univers primordial, qualifiée d'*ère de Planck*. En l'état de nos connaissances, elle constitue le moment le plus reculé jusqu'auquel nous pouvons reconstituer

l'histoire cosmique. Ce qui s'est passé à ce moment, et a fortiori auparavant, nous n'en savons rien, faute d'une connaissance des lois physiques valides dans de telles conditions de densité et de température (voir *Au-delà de l'espace et du temps*).

Un modèle de big bang (il en existe plusieurs variantes, qui se distinguent par des points de détail) se présente comme un récit de l'évolution de l'univers depuis l'ère de Planck jusqu'à aujourd'hui. Il s'agit bien d'une histoire cosmique, qui se précise dès que l'on met en jeu le fait que des conditions différentes de densité, pression, température, ne permettent pas l'existence des mêmes objets. Une molécule, ou même un atome, ne peut subsister dans un environnement à trop forte température. Une galaxie ne peut exister si la densité est trop élevée... Il en résulte que l'univers du passé devait contenir des objets d'une autre nature que ceux d'aujourd'hui, présenter un aspect très différent. La cosmologie s'est donné pour tâche de reconstituer la longue histoire de l'univers et de son contenu. Il ne s'agit pas seulement de rendre compte de la variation d'un thermomètre, ou d'un manomètre cosmique ; mais véritablement de décrire l'évolution graduelle de l'univers et de son contenu, de sa nature, de ses propriétés, de son organisation.

Lemaître, mettant ces idées en place, alla jusqu'à suggérer que les conditions particulières du passé très lointain (ce qu'il qualifiait d' « atome primordial », et que l'on évoque plutôt aujourd'hui comme ère de Planck) devaient être gouvernées par des phénomènes de nature quantique. En bref, l'univers devait différer de celui d'aujourd'hui d'autant plus que l'on remonte dans le passé : il évolue donc, il a une histoire.

Cette histoire est marquée par une succession de périodes, de durées plus ou moins longues, qui se sont enchaînées tout au long des milliards d'années. Certaines caractéristiques générales dominent cette tendance :

- Succession d'une ère dominée par le rayonnement électromagnétique (premier million d'années) et d'une ère dominée par la matière.

- Apparitions successives des premières particules élémentaires (*baryogenèse*, premières fractions de secondes), puis des premiers noyaux d'atomes (*nucléosynthèse primordiale*, premières minutes) ; puis des premiers atomes (*recombinaison*, premier million d'années) ; puis des structures astronomiques : galaxies, étoiles, planètes (premiers milliards d'années) et en même temps des molécules et petits grains de matière ; puis du Système Solaire et de notre planète.

Chaque étape repose sur la précédente, si bien que l'histoire cosmique se présente comme une mise en place graduelle des structures complexes qui peuplent aujourd'hui notre Univers (la plus « perfectionnée » étant la vie), structures qui étaient toutes absentes dans l'univers primordial.

Cette histoire est bien tracée, conforme aux lois de la physique. Et si nous sommes si confiants, c'est que les astronomes ont pu observer les conséquences directes de chacune des étapes : la répartition des différentes espèces chimiques confirme la nucléosynthèse primordiale et la physique stellaire. Le fond diffus cosmologique confirme la recombinaison. Les caractéristiques et la répartition des étoiles (et galaxies) confirment leurs phases de formation *etc.* Le récit devient extrêmement cohérent, conforme aux principes fondamentaux et aux théories de notre physique, et étayé par de nombreuses observations. En particulier, certains résultats très spécifiques montrent directement que l'univers évolue.

Pour autant, ces idées eurent beaucoup de mal à s'imposer comme le montre l'épisode des modèles stationnaires. Einstein mit longtemps à accepter l'idée de l'expansion, et Hubble lui-même n'y adhéra jamais tout à fait. Mais il fallut reconnaître le caractère incontestable du big bang.

### **Les modèles stationnaires : un univers sans histoire**

En 1948, l'américain Thomas Gold et le britannique Hermann Bondi proposèrent une famille de modèles cosmologiques reposant sur un « principe cosmologique parfait » (PCP). Celui-ci énonce l'équivalence de tous les instants cosmiques : l'univers doit présenter le même aspect à chaque moment de son histoire. Autrement dit, il n'a pas d'histoire. Il reste toujours identique à lui-même. Ces modèles offraient une alternative aux modèles de big bang, non encore baptisés ainsi à l'époque.

L'Univers ne peut être *statique* puisque, dès cette époque, l'expansion cosmique est un fait bien établi : les modèles proposés ici sont *stationnaires*. Mais la dilution impliquée par l'expansion implique un contenu de moins en moins dense. Comment l'Univers peut-il alors conserver le même aspect ? Pour répondre à cette difficulté, les partisans du modèle stationnaire ont inventé une nouvelle loi de la physique : « de la matière serait créée en permanence, de manière à compenser exactement la dilution causée par l'expansion ».

Quelques années plus tard, le physicien britannique Fred Hoyle améliore les modèles stationnaires, et les rend compatibles avec la relativité

générale. Dès lors très populaires, ils rassemblent ceux qui ne peuvent se résoudre à abandonner le mythe d'un univers sans histoire. Ils bénéficient d'une difficulté des modèles, concurrents, de big bang, alors en butte à une apparente contradiction avec les observations.

Finalement, ces dernières apparaîtront erronées, et les modèles stationnaires incompatibles avec de nouvelles mesures astronomiques qui montrent de plus en plus clairement que l'univers évolue. Le développement de la physique nucléaire (années 1940), puis surtout la découverte du fond diffus cosmologique (années 1960), marquent la fin des modèles stationnaires, et le début du règne du big bang.

### Historicité et déterminisme

J'ai qualifié d'« histoire » – et c'est l'usage courant – l'évolution cosmique que décrivent les modèles de big bang. Mais l'appellation convient-elle vraiment, dans un sens strict ? L'*historicité* qualifie généralement un récit au sein duquel prennent place des événements *contingents*, ou *imprévisibles*. Est-ce le cas ici ?

Les lois de la physique sont parfaitement déterministes. Cela n'exclut pas que certains aspects de la réalité du monde, que la physique serait inapte à décrire, puissent échapper au déterminisme. Mais tout ce qui relève d'une description physique est déterministe. Cela veut dire que, lorsqu'un système évolue, son état à un instant donné ( $t_i$ ) *détermine* son état à un instant ultérieur ( $t_f$ ). Bien souvent, on qualifie l'état à l'instant  $t_i$  de « conditions initiales », celui à  $t_f$  de « conditions finales ». L'état final ne dépend donc que de l'état initial. Cela ne vaut naturellement que si le système est isolé, c'est-à-dire si rien d'extérieur à lui ne vient influencer son évolution. Seul un événement causé par quelque chose d'extérieur au système, qualifié de *contingent*, peut échapper à la détermination.

Les calculs, et tout spécialement les simulations numériques que permettent nos ordinateurs, illustrent ce déterminisme : les équations représentant les lois physiques, appliquées à l'ensemble des données qui représentent l'état initial d'un système, fournissent bien l'ensemble des données qui représentent l'état final, même si cela exige le plus souvent des calculs longs et complexes. S'il y avait de l'indéterminisme dans la physique, cela voudrait dire que l'on pourrait tout aussi bien jouer aux dés pour trouver le résultat de certains calculs.

Tout ceci paraît bien simple et réducteur. Il ne s'agit en effet que d'une possibilité théorique. En pratique, la résolution exacte du problème exigerait de connaître *parfaitement* l'état d'un système, par exemple ses



conditions initiales. Nous verrons que cela se révèle impossible, ce qui fait du déterminisme une pétition de principe, dont l'intérêt et les conséquences demeurent très limités.

Il est à noter que la loi du déterminisme s'applique dans les deux directions du temps : l'état final d'un système détermine tout autant l'état initial que la réciproque. Nous sommes habitués à considérer le sens usuel du temps, de l'état initial vers l'état final. Mais les lois fondamentales de la physique ne connaissent pas le sens du temps. C'est nous qui l'introduisons, essentiellement, par le fait que nous connaissons (au moins partiellement) les conditions passées, mais pas les conditions futures. Du point de vue de la physique fondamentale, il est exactement équivalent de dire que l'état initial détermine l'état final, ou la réciproque. De notre point de vue, compte tenu de notre mémoire, ce n'est évidemment plus la même chose.

### **L'univers déterminé ?**

La cosmologie des modèles de big bang donne une description *physique* de l'univers. Il est parfaitement isolé, puisque rien d'autre n'existe, par définition. Son évolution doit donc être déterministe. L'état « initial » de l'univers (par exemple il y a 14 milliards d'années) détermine son état présent ; tout comme d'ailleurs son état présent détermine son état initial. Précisons que le terme « initial » ne renvoie pas à un début (ou, encore moins, une création) de l'univers, mais au début de la phase d'évolution à laquelle nous nous intéressons, par exemple l'ère de Planck.

Ceci pourrait, à première vue, nous faire conclure à une absence d'historicité, puisque l'évolution de l'univers, comme celle d'une machine bien réglée ou d'un programme d'ordinateur, devrait ne présenter aucune surprise, ne laisser place à aucun événement contingent.

Au contraire, de nombreux événements extérieurs ont modifié, par exemple, l'évolution de la planète Terre : changements de l'activité solaire, influence de la Lune, variations d'orbite dues à des influences astronomiques, chute d'une météorite ... Ces événements *contingents* ont joué des rôles déterminants dans l'évolution de notre planète : même si l'on avait connu à la perfection son état initial, il eût été impossible d'en déduire toutes les péripéties de son évolution ultérieure.

### Prédiction – rétrodiction

Pour un système isolé, pour l'Univers, l'état initial *détermine* l'état final. Peut-on pour autant *prédire* l'état final à partir de l'état initial ? La réponse est parfaitement claire. Si l'on connaissait parfaitement l'état initial, elle est positive. Sinon, on ne peut rien dire *a priori*. Or, cette connaissance parfaite est impossible, pour au moins trois raisons :

- Nos connaissances résultent en général de mesures. Mais toute mesure est de précision finie, son résultat comporte nécessairement une erreur par définition inconnue. Or, deux états (initiaux) d'un système qui diffèrent très peu (où par exemple certaines grandeurs possèdent des valeurs très voisines mais distinctes) peuvent avoir des évolutions ultérieures extrêmement différentes. Ceci caractérise les systèmes dits *chaotiques*, mais il s'avère que, à partir d'un certain niveau de complexité, tout système est chaotique.

- Le nombre de molécules que contient un système aussi simple qu'un verre d'eau dépasse le nombre d'Avogadro ( $10^{23}$ ). Il est évidemment impossible de répertorier, à un instant donné, toutes leurs positions et vitesses. Sans parler de l'univers entier ! Or nous ne pouvons jamais être certains que de négliger une seule de ces molécules ne va pas modifier l'estimation de l'évolution ultérieure.

- Enfin, nous pensons que les systèmes physiques sont gouvernés en dernier ressort par les lois de la physique quantique. Or, celles-ci interdisent, pour des raisons fondamentales (qui ne sont pas liées à notre insuffisance à faire des mesures précises ou enregistrer un grand nombre de données), de connaître parfaitement l'état d'un système : nous aurons beau perfectionner nos modes opératoires, nous n'arriverons jamais à cette connaissance absolue.

Il en résulte que le déterminisme est très loin d'entraîner la prédictibilité. Et puisque les choses fonctionnent dans les deux sens du temps, il est tout aussi loin d'entraîner la rétroprédictibilité, c'est-à-dire la possibilité de reconstituer l'état initial à partir de la connaissance (effective et jamais parfaite) de l'état final.

Heureusement, nous savons bien que si *tout* n'est pas prédictible, *certaines choses* le sont. Je puis affirmer sans trop de risque que le Soleil se lèvera demain, qu'après l'hiver viendra l'été... Tel est le miracle de la physique : au sein de la multitude de données (inaccessibles) qui caractérisent un système, il suffit de connaître certaines d'entre elles pour prédire certains aspects de l'évolution du système. Il est impossible de

connaître les vitesses de toutes les molécules d'un verre d'eau, mais on peut facilement connaître leur vitesse (quadratique) moyenne, qui se confond (à une constante de conversion près) avec sa température. Cela suffit pour prédire à quel moment, dans un environnement donné, l'eau va se refroidir, s'évaporer ou cristalliser. La position et la vitesse d'un corps céleste dans le Système Solaire permettent aux astronomes de prédire (avec une précision limitée) son évolution ultérieure, sans se préoccuper de sa nature, et de nous avertir d'un risque éventuel de collision avec la Terre. À partir d'un ensemble de données choisies, les météorologues nous annoncent le climat de demain (ou celui d'hier, mais cela intéresse moins de monde). Il existe ainsi un très grand nombre de possibilités partielles de prédiction, identifiées par les physiciens : malgré les insuffisances mentionnées, la physique est au moins partiellement prédictive. Il en va de même pour la cosmologie. Ces possibilités de prédiction (ou rétrodition) permettent de construire des modèles cosmologiques raisonnables, en dépit de notre pauvre connaissance observationnelle de l'Univers.

Ainsi, les cosmologues assurent que l'univers, en expansion aujourd'hui, le sera toujours demain ; et qu'il l'était hier. À partir du taux d'expansion aujourd'hui, et de la quantité globale de matière que contient l'univers, ils pensent pouvoir prédire le taux d'expansion de demain (ou d'hier). Hélas, nous connaissons bien mal cette matière (de grandes quantités de matière noire, inconnues, sont très probablement présentes). Les possibilités de prédiction ou de rétrodition sont ainsi limitées, mais nous pouvons au moins les encadrer, comme les sondages à la veille d'un scrutin. Autre exemple, nous pensons pouvoir affirmer que, dans l'univers, une concentration de matière doit se condenser de plus en plus, jusqu'à former une étoile ou une galaxie ; et réciproquement, que toute étoile ou galaxie observée a dû commencer comme simple condensation gazeuse dans l'univers ancien.

Il reste que, comme pour tout système physique, la stricte [rétro-]prédictibilité est impossible en cosmologie. Mais elle opère de manière limitée, suffisamment pour nous permettre de retracer les grandes lignes de l'évolution cosmique. Une contingence apparaît dans le récit, mais son origine n'est pas extérieure : nul autre univers ne vient importunément perturber l'évolution du nôtre. Nulle faillite du déterminisme. Cette contingence provient de notre ignorance, dont les causes ont été répertoriées plus haut. C'est là que se niche la véritable historicité de la cosmologie. Et de fait, une proportion immense de ce que l'on a observé dans le cosmos – étoiles et galaxies de tous types, et objets encore plus

étranges – n’aurait sans doute jamais pu être *prévue* par aucun modèle. Il en va de même de la chronologie des événements cosmiques. Les cosmologues l’ont établie en s’appuyant sur les résultats d’observations astronomiques dévoilant des états passés de l’univers, qui jouent le rôle de faits contingents. La seule application des théories n’aurait pas permis de reconstituer cette chronologie, par rétroprédiction à partir de l’état présent de notre univers.

CEA, marclr@cea.fr

**BIBLIOGRAPHIE**

Une version abrégée de cet article est parue dans *Sciences et Avenir hors série*, n°146, 2006

- [1] LACHIEZE-REY MARC, *Au-delà de l'espace et du temps : la nouvelle physique*, Paris, éd. Le Pommier, 2004.
- [2] LACHIEZE-REY MARC, *Initiation à la Cosmologie*, Paris, Dunod, 2004 (4<sup>e</sup> édition).
- [3] LACHIEZE-REY MARC ET LUMINET JEAN-PIERRE, *Figures du ciel*, Paris, Le Seuil / Bibliothèque nationale de France, 1998.