

Université de Montréal

L'astronomie nouvelle de Kepler et la logique de la découverte

par

CÉLINE RIVERIN

Département de philosophie
Faculté des arts et des sciences

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures et postdoctorales
en vue de l'obtention du grade de Ph.D. en philosophie

Août 2014

© CÉLINE RIVERIN, 2014

Université de Montréal
Faculté des études supérieures et postdoctorales

Cette thèse intitulée :

L'astronomie nouvelle de Kepler et la logique de la découverte

présentée par CÉLINE RIVERIN

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

François LEPAGE
Président-rapporteur

YVON GAUTHIER
Directeur de recherche

François DUCHESNEAU
Membre du jury

Serge ROBERT
(Université du Québec à Montréal)
Examineur externe

Patrick DUFOUR
Représentant du doyen de la FESP

Résumé

Cette thèse propose une étude des raisons théoriques et empiriques impliquées dans l'élaboration d'une nouvelle astronomie par Johannes Kepler (1571-1630) tel qu'exposé dans son ouvrage *Astronomia nova* (1619). Cette thèse se déroule en deux temps : la première partie touche de près aux textes mêmes de Kepler, tandis que la seconde partie utilise la notion d'abduction pour interpréter logiquement ce processus de découverte et de justification. La première partie débute avec une analyse du projet de Kepler et de ses fondements philosophiques, métaphysiques et théologiques tels qu'exposés dans son premier ouvrage, le *Mysterium cosmographicum*. Ensuite, une étude des propos explicites de Kepler quant à la nature et au statut des hypothèses astronomiques est proposée via une étude de son traité intitulé *Apologia pro Tychone contra Ursum*. Une étude attentive des sources philosophiques, mathématiques et scientifiques ayant influencé Kepler pour sa nouvelle astronomie est ensuite proposée avant l'analyse détaillée des arguments scientifiques et des différentes étapes démonstratives qui sont présentés dans l'*Astronomia nova*. La deuxième partie vise à éclairer le débat sur l'abduction en se penchant d'abord sur trois approches traditionnelles (Platon, Aristote et Épicure) quant à la connaissance scientifique des phénomènes célestes permettant d'obtenir un discours vraisemblable ou une multiplicité d'explications concordantes avec les phénomènes. Enfin, quatre interprétations contemporaines et abductives du processus de découverte suivi par Kepler dans l'*Astronomia nova* sont présentées, reformulées et critiquées afin de proposer une nouvelle interprétation abductive laissant une plus grande place au projet même de construire une astronomie nouvelle fondée sur les causes. Cela nous donne des outils pour mieux saisir le sens et la portée de ce qui peut être désigné comme étant la « révolution képlérienne », soit le passage d'un système géocentrique à un système non pas simplement héliocentrique mais héliodynamique, ayant permis aux astronomes de s'affranchir du paradigme des orbites circulaires.

Mots-clefs : Philosophie ; astronomie ; histoire des sciences ; logique de la découverte ; Kepler ; abduction ; héliodynamisme

Abstract

This thesis offers a study of the theoretical and empirical reasons involved in the elaboration of a new astronomy by Johannes Kepler (1571-1630) as displayed in his work *Astronomia nova* (1619). The thesis consists of two parts: the first part deals with Kepler's actual writings, whereas the second part uses the notion of abduction in order to interpret with logic that process of discovery and justification. The first part begins with an analysis of Kepler's project and its philosophical, metaphysical and theological foundations as displayed in his first work piece, *Mysterium cosmographicum*. Then follows a review of Kepler's own words regarding the nature and status of astronomical hypotheses as proposed through a study of his treatise entitled *Apologia pro Tychone contra Ursum*. A careful study of philosophical, mathematical and scientific sources that have influenced Kepler for his new astronomy is then proposed prior to a detailed analysis of the scientific arguments and different demonstrative steps that are presented in *Astronomia nova*. The second part aims at enlightening the debate on abduction first by looking at three traditional approaches (Plato, Aristotle and Epicurus) relative to the scientific knowledge of celestial phenomena that bring about a plausible discourse or a series of explanations that fit with the phenomena. Finally, four modern abductive interpretations of the discovery process followed by Kepler in *Astronomia nova* are presented, reformulated and reviewed in order to propose a new abductive interpretation that leave a greater place to the actual project of building a new astronomy based on causes. This provides tools to better understand the meaning and significance of what can be understood as the "Keplerian revolution", namely the transition from a geocentric system to a system not simply heliocentric but heliodynamic, which freed astronomers from the paradigm of circular orbits.

Keywords : Philosophy ; astronomy ; history of science ; logic of discovery ; Kepler ; abduction ; heliodynamics

Table des matières

Résumé	i
Abstract.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des tableaux.....	v
Références aux œuvres de Kepler	vi
Remerciements.....	vii
Introduction.....	1
PREMIÈRE PARTIE : La fondation d’une astronomie nouvelle	6
Chapitre 1	
Une première défense de l’héliocentrisme : les arguments du <i>Mysterium cosmographicum</i>	7
1.1. L’importance du <i>Mysterium cosmographicum</i> pour l’astronomie nouvelle.....	9
1.2. Le projet cosmographique.....	17
1.3. Un héliocentrisme plus fort que celui de Copernic.....	21
1.4. La théorie des archétypes mathématiques.....	26
1.5. La méthode <i>a priori</i> mise à l’épreuve par les données observationnelles	30
Chapitre 2	
La nature et le statut des hypothèses astronomiques selon Kepler	34
2.1. L’astronomie et ses tâches	36
2.2. La méthode astronomique.....	40
2.3. L’évaluation des hypothèses astronomiques.....	43
2.4. Le problème de la concordance des hypothèses et des données observationnelles	47
2.5. L’importance du réalisme et des fondements <i>a priori</i>	51
Chapitre 3	
Les sources ayant influencé Kepler dans son élaboration d’une nouvelle astronomie ou physique céleste <i>aitiológētos</i>	54

3.1. L'apport et la critique d'Aristote	55
3.2. L'introduction des mathématiques comme clef pour comprendre l'univers : l'influence des Pythagoriciens, de Platon et des Néo-Platoniciens	78
3.3. Les sources mathématiques.....	95
3.4. L'influence du <i>De magnete</i> de Gilbert.....	105
 Chapitre 4	
Les recherches scientifiques de l' <i>Astronomia nova</i>	112
4.1. Le premier modèle de Mars : l' <i>hypothesis vicaria</i>	115
4.2. La résolution du problème du mouvement de la Terre	123
4.3. La loi des aires	128
4.4. La découverte de l'ellipse	157
 DEUXIÈME PARTIE : Abduction et découverte scientifique.....	
168	
 Chapitre 5	
La connaissance scientifique des phénomènes célestes : un discours vraisemblable.....	169
5.1. La méthode du <i>Timée</i> de Platon.....	171
5.2. Les voies anagogique et apagogique d'Aristote	174
5.3. La théorie des explications multiples dans la science épicurienne	176
 Chapitre 6	
Les interprétations abductives de la démarche de Kepler.....	190
6.1. Trois formulations de l'abduction selon Peirce	192
6.2. Le modèle de Hanson.....	200
6.3. L'abduction inverse et l'abduction comparative de Kleiner.....	204
6.4. L'abduction inverse de Myrstad	213
6.5. Abduction et astronomie nouvelle	215
 Conclusion	
217	
 Bibliographie.....	
221	

Liste des tableaux

Tableau 1 :

Les différentes tâches de l'astronome selon la tradition et quatre ouvrages de Kepler69

Références aux œuvres de Kepler

Toutes les citations de Kepler ont été reproduites en latin en note de bas de page, en suivant l'édition de C. Frisch (*Opera omnia*, Vols 1-8. éd. par C. Frisch. Frankfurt & Erlangae, Heyder und Zimmer, 1858-1870) ; elles sont suivies du numéro du volume et du numéro des pages correspondantes dans cette édition. La seule exception concerne le traité *Apologia pro Tychone contra Ursum* pour lequel j'ai employé l'édition latine présentée dans l'ouvrage de N. Jardine¹. Après la référence à l'édition latine, le titre de l'ouvrage de Kepler est indiqué, de même que le numéro du chapitre (ou du livre, dans le cas de l'*Harmonice mundi*) correspondant.

Hormis celles du *Mysterium cosmographicum*², les traductions françaises sont de moi, sauf indication contraire. Dans le cas de l'*Astronomia nova*, la traduction anglaise de W. H. Donahue³ m'a été très utile et c'est pourquoi j'indique, après la référence dans l'édition latine de Frisch et le numéro du chapitre, la page correspondante dans la traduction anglaise de Donahue.

¹ Cf. JARDINE (1984). S'y trouve également une traduction anglaise de l'*Apologia* qui m'a été utile.

² Pour lequel il existe une excellente traduction française, celle de A. Segonds. Cf. KEPLER ([1596/1621] 1984).

³ Cf. KEPLER ([1609] 1992).

Remerciements

Mes remerciements les plus enthousiastes et les plus sincères vont en tout premier lieu à mon directeur de recherche, le professeur Yvon Gauthier. Ce fut un honneur de pouvoir bénéficier de ses commentaires judicieux et inspirants, tout comme ce fut un privilège de pouvoir bénéficier de sa grande disponibilité, de son soutien et de ses précieux conseils.

Merci aux professeurs du Département de philosophie de l'Université de Montréal, grâce à qui j'ai pu acquérir une formation philosophique de grande qualité. Merci à mes collègues étudiants pour les discussions enrichissantes et motivantes durant les séminaires et, plus récemment, durant les rencontres du Laboratoire de philosophie des sciences que j'ai eu la chance de connaître grâce à Thiago Hutter. Je voudrais remercier également le responsable des études supérieures, le professeur David Piché, de même que la technicienne en gestion des dossiers étudiants, madame Pierrette Delisle, pour m'avoir facilité la vie à plusieurs reprises durant mon troisième cycle d'études universitaires.

Cette thèse n'aurait pu être réalisée sans le soutien financier du Fonds québécois de la recherche sur la société et la culture (FQRSC) et du Conseil de recherche en sciences humaines (CRSH), auquel s'est ajoutée une bourse d'excellence du Département de philosophie. Merci aussi à monsieur Georges Bodnar et madame Lyne Bourque pour m'avoir offert, pendant un été, un espace de lecture et de travail confortable et agréable.

Toute ma gratitude va également aux chers membres de ma famille : mon père Gérard, ma mère Madeleine, ma sœur Jacynthe et mon frère Jean-Luc. Leur appui inconditionnel s'est manifesté de multiples façons, tant par leurs mots que par leurs gestes. Je voudrais remercier aussi mes chers amis, qui ont fait preuve de compréhension face à la réclusion nécessaire pour mener ce projet à terme. Merci aussi à Sibylle, Claudelle et mon collègue préféré Martin Desrosiers pour leur soutien, leur écoute et leur humour lors des derniers milles de cette entreprise.

Alors que se terminent mes études doctorales, je voudrais remercier ma toute première enseignante de philosophie au collégial, madame Isabelle Leblanc, pour avoir éveillé en moi cet amour de la sagesse qui ne m'a jamais quittée depuis. Enfin, je tiens à remercier Dave Anctil, qui a vivement stimulé mon goût pour la recherche en philosophie et qui m'a guidée maintes fois dans ce chemin passionnant.

Introduction

L'astronome et mathématicien Johannes Kepler (1571-1630) a été l'un des principaux artisans de la révolution scientifique inaugurant la science moderne. Son apport en science est immense : non seulement Kepler fut-il le premier défenseur sérieux de l'héliocentrisme de Copernic, mais il a permis rien de moins que la naissance de l'astrophysique, en concevant l'étude du mouvement sidéral comme une astronomie fondée sur les causes, c'est-à-dire une discipline mixte alliant une description géométrique à des fondements physiques et cosmologiques. Ses écrits – dont la portée va largement au-delà des trois lois célèbres du mouvement céleste que les scientifiques ont retenues et qui sont toujours effectives, soit les fameuses « lois de Kepler » – contiennent toutes les étapes de sa démarche, ce qui en fait un auteur particulièrement éclairant pour les philosophes, les historiens des sciences et ceux qui s'intéressent à la logique de la découverte.

L'œuvre de Kepler est particulièrement intéressante puisque l'on peut y retrouver ce qui s'est révélé être un moment charnière de la révolution astronomique. En effet, deux facettes sont présentes au sein de la démarche scientifique de Kepler : l'une, archaïque, se fondant sur les traditions néo-platonicienne et pythagoricienne, de même que sur des conceptions animistes et théologiques ; l'autre, plus novatrice, critiquant certains aspects de la tradition et proposant des explications scientifiques qui invoquent des vertus motrices qui se diffusent selon des règles mathématiques, ce qui annonce la période moderne. Pour exprimer cette dualité, le philosophe Alexandre Koyré compare l'astronome au dieu Janus, qui a deux visages : « Kepler est un véritable *Janus bifrons* : on trouve dans son œuvre le passage, extrêmement caractéristique, d'une conception encore animiste de l'Univers à une conception mécaniste. »⁴ Ce passage crucial effectué par Kepler a incité certains historiens et philosophes des sciences à l'étudier en tant que découvreur exemplaire ayant participé à la révolution astronomique débutée par Copernic et achevée par Newton.

Si ceux qui s'intéressent à la révolution scientifique s'entendent pour dire que la pensée de Kepler représente un tournant majeur dans l'histoire de l'astronomie, la façon dont il faut interpréter ce tournant ne fait pas l'objet d'un consensus. Ainsi, les premiers

⁴ KOYRÉ (1973b), p. 56.

commentateurs⁵ ont surtout mis l'accent sur les trois lois du mouvement céleste retenues par la postérité, faisant de Kepler celui qui aurait « vu » le parcours elliptique de la planète Mars parmi les nouvelles données observationnelles de l'époque. Cette voie interprétative, qui met l'accent sur le tâtonnement empirique de Kepler à partir des nouvelles données d'observation obtenues auprès de Tycho Brahe, n'a été possible qu'au prix d'une réduction de la pensée képlérienne mettant de côté une multitude de fondements métaphysiques et d'aspects méthodologiques, jugés non scientifiques bien qu'ils soient présents chez Kepler tant dans les œuvres de jeunesse que dans les œuvres ultérieures. À l'inverse, une autre voie interprétative a plutôt mis en évidence les aspects métaphysiques et ésotériques chez Kepler, néanmoins jugés encore une fois irrationnels ou non scientifiques. Enfin, suite aux contributions de C. S. Peirce (1839-1914) et de N.R. Hanson (1924-1967) au sein de la logique de la découverte scientifique, la plupart des philosophes et logiciens s'entendent sur le fait que Kepler a été un éminent praticien de l'abduction, sans pour autant que cette notion même d'abduction ne fasse l'objet d'un consensus⁶. Bien que l'approche abductive soit toujours le terrain de nombreux débats, son intérêt réside toutefois en ce qu'elle permet d'inclure les fondements métaphysiques et théologiques de l'œuvre de Kepler au sein de son entreprise scientifique et de les réinterpréter comme prémisses logiques au cœur d'un raisonnement logique, nous donnant ainsi des outils d'analyse pour mieux comprendre la dialectique entre théorie et observations empiriques qui est présente tout au long des recherches képlériennes. Inversement, je crois qu'une telle étude sur la démarche scientifique de l'astronome peut également éclairer la philosophie des sciences contemporaine en fournissant un exemple particulièrement instructif d'une génération féconde et rationnelle d'hypothèses explicatives.

Cette thèse propose une étude des raisons théoriques et empiriques impliquées dans l'élaboration d'une nouvelle astronomie par Kepler. L'œuvre principale à l'étude sera l'*Astronomia nova aitiológētos seu physica coelestis*⁷, l'un des ouvrages majeurs ayant donné le coup d'envoi à la révolution scientifique. Non seulement contient-il les deux premières lois de Kepler concernant le mouvement planétaire – à savoir, que les planètes suivent une

⁵ Nous reviendrons plus en détail sur ce débat au chapitre 1 de cette thèse.

⁶ Nous reviendrons plus en détail sur ce débat aux chapitres 5 et 6 de cette thèse.

⁷ Prague, 1609.

trajectoire elliptique et que le rayon les reliant au Soleil balaie des aires égales en temps égaux – mais il est le premier ouvrage relatant les recherches scientifiques de Kepler concernant les mouvements planétaires (essentiellement, ceux de Mars) suite aux nouvelles données recueillies par Tycho Brahe. Ce faisant, Kepler pose les assises d’une nouvelle astronomie dont la nature, la méthode et les principes étaient absolument révolutionnaires en regard de l’aristotélisme prévalent à cette époque, qui recommandait une étude séparée des mondes céleste et sublunaire tout en bannissant les mathématiques de l’étude scientifique de la nature. Pour élaborer sa nouvelle science, Kepler s’inspire d’idées néo-platoniciennes et pythagoriciennes pour réintroduire l’étude mathématique des corps célestes et proposer une astronomie à la fois adéquate empiriquement, fondée géométriquement et en accord avec les exigences de la physique.

Si l’*Astronomia nova* se concentre sur la dérivation et la vérification des théories à partir des données empiriques et met ainsi l’accent sur une méthode *a posteriori*, nous ne saurions en comprendre la véritable signification sans relire attentivement le *Mysterium cosmographicum*⁸, qui donne une large place à la méthode *a priori*. Ce premier ouvrage de Kepler contient un large éventail de présupposés métaphysiques, philosophiques et théologiques qui le guideront tout au long de ses recherches en astronomie. Ces fondements, nous le verrons, font partie intégrante de la science recherchée par Kepler et qui vise à établir les causes véritables de la disposition et du mouvement des planètes, de sorte que ces causes puissent non seulement rendre compte des observations, mais aussi expliquer pourquoi il en va ainsi et pas autrement. Bien que l’*Astronomia nova* ne reprenne pas explicitement ces fondements, nous verrons qu’il est justifié de concevoir que cet ouvrage ait comme trame de fond les questions et fondements développés dans le *Mysterium cosmographicum*. Une attention spéciale sera également accordée à un traité non publié du vivant de Kepler, l’*Apologia pro Tychone contra Ursum*, ouvrage écrit à la demande de Tycho Brahe et qui est le seul de ses ouvrages qui soit consacré explicitement à la nature et au statut des hypothèses astronomiques.

⁸ Tübingen, 1596; seconde éd., Frankfurt, 1621.

Cette thèse se déroule en deux temps. La première partie touche de près aux textes mêmes de Kepler, tandis que la seconde partie utilise la notion d'abduction pour interpréter logiquement son processus de découverte et de justification.

La première partie débute avec un chapitre consacré à l'analyse du projet de Kepler et de ses fondements philosophiques, métaphysiques et théologiques tels qu'exposés dans son premier ouvrage, le *Mysterium cosmographicum*. Après avoir vu que ces propos sont encore pertinents et valides dans l'*Astronomia nova*, quoique de façon implicite, nous nous pencherons sur le projet cosmographique de Kepler (nature et méthode) tel qu'il le conçoit à l'origine. Nous verrons également les arguments qui poussent Kepler à adopter et à défendre l'héliocentrisme de Copernic, de même que sa théorie des archétypes qui joue un rôle crucial pour justifier la possibilité d'une connaissance mathématique de la nature.

Ensuite, dans le chapitre 2, nous nous tournerons vers les propos explicites de Kepler quant à la nature et au statut des hypothèses astronomiques tels qu'exposés dans l'*Apologia pro Tychone contra Ursum*. Cela nous aidera à préciser la pensée de Kepler quant à l'astronomie, ses fondements et sa méthode. Nous verrons également comment il répond au problème de la concordance des hypothèses et des données observationnelles auquel sa théorie réaliste prête le flanc.

Le chapitre 3 sera consacré à une étude attentive des sources philosophiques, mathématiques et scientifiques ayant influencé Kepler pour la fondation de sa nouvelle astronomie *aitiológētos* ou physique céleste. Plus précisément, nous verrons que Kepler s'inspire de ces sources (Aristote, Platon, Pythagoriciens, Néo-platoniciens, Euclide, Archimède, Apollonius, Pappus d'Alexandrie et William Gilbert) tout en les critiquant. Ce tour d'horizon me semble essentiel pour mettre en lumière le projet de Kepler et voir jusqu'à quel point et en quel sens il s'agit d'une « nouvelle » astronomie.

Le chapitre 4, qui clôt la première partie, sera consacré exclusivement à l'analyse détaillée des arguments scientifiques et des différentes étapes démonstratives qui sont présentés dans l'*Astronomia nova*. L'accent sera mis sur la genèse et les justifications théoriques et empiriques des hypothèses ayant fondé l'astronomie nouvelle. Ce faisant, nous verrons comment sont générées, formulées et justifiées les deux premières lois de Kepler.

La deuxième partie débutera, au chapitre 5, par l'étude de trois approches traditionnelles (Platon, Aristote et Épicure) quant à la connaissance scientifique des phénomènes célestes permettant d'obtenir un discours vraisemblable ou une multiplicité d'explications concordantes avec les phénomènes. Cela nous aidera à mettre en lumière certains éléments pertinents pour le débat contemporain sur l'abduction.

Enfin, dans le chapitre 6, nous présenterons, reformulerons et critiquerons quatre interprétations abductives contemporaines (Peirce, Hanson, Kleiner et Myrstad) du processus de découverte suivi par Kepler dans l'*Astronomia nova*. Cela nous permettra de proposer ensuite une nouvelle interprétation abductive laissant une plus grande place au projet même de Kepler, ce qui nous donnera des outils pour mieux saisir le sens et la portée de ce qui peut être désigné comme étant la « révolution képlérienne ».

PREMIÈRE PARTIE : La fondation d'une astronomie nouvelle

Chapitre 1

Une première défense de l'héliocentrisme : les arguments du *Mysterium cosmographicum*

Comprendre la nature et la méthode de la nouvelle astronomie proposée par Kepler est impossible sans se pencher d'abord sur son tout premier ouvrage, le *Mysterium cosmographicum*⁹. Bien qu'il ne contienne aucune des trois lois du mouvement planétaire que les scientifiques modernes ont retenues, ce *primum opus* képlérien est d'une importance capitale pour qui veut bien comprendre les recherches de cet astronome : vaste plaidoyer en faveur de l'héliocentrisme de Copernic, il contient notamment un large éventail de présupposés métaphysiques, philosophiques et théologiques, qui le guideront tout au long de ses recherches en astronomie. Ces fondements, comme nous le verrons tout au long de cette thèse, sont indispensables à la quête de Kepler en ce qui concerne le monde sidéral : rechercher les causes véritables de la disposition et du mouvement des planètes, de sorte qu'elles puissent non seulement rendre compte des observations, mais aussi expliquer pourquoi il en va ainsi et pas autrement. Pour ce faire, l'élaboration d'un système justifié *a priori* s'avère indispensable pour que les éléments observés dans le ciel puissent devenir des conséquences nécessaires du modèle.

Il est vrai que l'*Astronomia nova*, premier ouvrage relatant les recherches scientifiques de Kepler concernant les mouvements planétaires (essentiellement, ceux de Mars) suite aux nouvelles données recueillies auprès de Tycho Brahe, ne reprend pas le système exposé dans le *Mysterium cosmographicum*, système reposant notamment sur les cinq polyèdres réguliers convexes. De plus, aucune allusion directe n'y est faite aux archétypes¹⁰, fondamentaux dans ce système initial, ni même à l'harmonie du monde, concept fécond qui trouve ses germes dès le *Mysterium cosmographicum*. Cette absence incite un commentateur tel que Bruce Stephenson, qui se penche essentiellement sur les principes physiques derrière la nouvelle théorie planétaire développée par Kepler dans l'*Astronomia nova*, à écarter totalement de son

⁹ Tübingen, 1596; seconde éd., Frankfurt, 1621.

¹⁰ Hormis en un endroit où le mot « archétype » est évoqué, entre parenthèses. Cf. *Opera omnia*, III, p. 304 ; *Astronomia nova*, XXXIV, p. 385.

analyse les notions d'archétypes ou d'harmonie, reconnaissant tout de même au passage – et avec raison – que son étude est par là incomplète¹¹. L'excellent ouvrage de Rhonda Martens vient pallier cette lacune en mettant l'accent justement sur cette métaphysique sous-jacente à la physique céleste¹². Pour ma part, étant donné mon objectif principal qui est de mettre au jour l'itinéraire rationnel képlérien ayant mené à l'élaboration de son astronomie nouvelle, il me semble indispensable de tenir compte des véritables enjeux de la science que Kepler était en train de fonder ; et pour ce faire, il me semble absolument nécessaire de tenir compte de son projet initial.

J'ai déjà procédé à une analyse du *Mysterium cosmographicum* et du système qui y est proposé dans le second chapitre de mon mémoire de maîtrise¹³, afin de mettre en évidence les questions qui allaient guider Kepler tout au long de ses recherches en astronomie, particulièrement ses recherches fondées sur l'harmonie du monde (dont la science allait retenir ce que nous avons appelé la « troisième loi de Kepler ») et qui sont exposées notamment dans l'*Harmonice mundi*. Il ne sera pas nécessaire de retranscrire l'exposé ici ni de revenir en détail sur le contenu du *Mysterium cosmographicum* ; il est toutefois impératif de revenir sur le projet initial de Kepler, de même que sur les présupposés métaphysiques, philosophiques et théologiques qui sont exposés dans son *primum opus*, sans quoi il nous est impossible de comprendre le cheminement rationnel employé par Kepler dans l'*Astronomia nova* où notamment, il rejette certaines hypothèses pourtant concordantes avec les observations. Dans le présent chapitre, je montrerai d'abord **(1.1)** dans quelle mesure, pour Kepler, ce qui est exposé dans le *Mysterium cosmographicum* demeure encore pertinent et valide lorsqu'il effectue ses nouvelles recherches dans l'*Astronomia nova*, avant d'expliquer ensuite **(1.2)** comment, dans son premier ouvrage, Kepler conçoit son projet scientifique, c'est-à-dire les objectifs et la méthode de cette science qu'il révolutionnera. Je poursuivrai ensuite en mettant au jour les fondements et présupposés exposés dans le *Mysterium cosmographicum*, en soulignant **(1.3)** les arguments soutenant l'héliocentrisme et **(1.4)** l'importance des archétypes mathématiques pour son modèle fondé sur les cinq polyèdres réguliers convexes. Enfin, je terminerai par quelques mots sur **(1.5)** la façon dont Kepler procède, au cœur de cette méthode

¹¹ Cf. STEPHENSON (1987), p. 2.

¹² Cf. MARTENS (2000).

¹³ Cf. RIVERIN (2007), pp. 25-43.

a priori, lorsqu'il confronte ses hypothèses astronomiques, déduites logiquement de ces présupposés, aux données observationnelles de l'époque du *Mysterium cosmographicum*. Ce sera l'occasion de voir une première version de la dialectique entre théorie et observations empiriques qui est présente tout au long des recherches képlériennes. À noter que tout au long de ce chapitre, je mettrai l'accent sur les propos de Kepler lui-même et sur ses différents présupposés ; l'analyse plus profonde de leurs sources philosophiques, mathématiques et autres sera réservée pour le chapitre 3 où ces dernières seront traitées à l'aune de la fondation de l'astronomie nouvelle. Une exception sera toutefois apportée quant aux sources ayant appuyé l'adoption de l'héliocentrisme, qui seront mises en valeur dans ce chapitre-ci étant donné que l'héliocentrisme est au cœur du projet de ce premier ouvrage.

1.1. L'importance du *Mysterium cosmographicum* pour l'astronomie nouvelle

Kepler publie son premier ouvrage en 1596, suite à l'inspiration qu'il aurait eue à l'âge de vingt-trois ans, alors que pour instruire ses auditeurs il se mit à inscrire dans un même cercle une multitude de triangles, ou plutôt de quasi-triangles, de telle façon que la fin de l'un formait le commencement du suivant.¹⁴ Le jeune mathématicien vit dans ce schéma l'inspiration qui lui permit d'élaborer ensuite son premier modèle de l'univers, fondé sur les cinq polyèdres réguliers convexes rendant compte de l'ordre et de la configuration du monde. Il est à noter que Kepler avait déjà été initié par son maître Michel Mästlin au modèle héliocentrique de Copernic, modèle dont il se « délectait »¹⁵, et qui faisait concurrence à celui de Ptolémée sans pour autant être accepté par la majorité, notamment pour des raisons empiriques¹⁶.

Ce premier ouvrage képlérien eut une immense importance socio-historique puisque c'est suite à la lecture du *Mysterium cosmographicum* que Tycho Brahe, alors *mathematicus* impérial de Rodolphe II, proposa à son auteur de le rejoindre à Prague pour l'assister dans ses recherches en astronomie. Grâce à ce nouvel emploi, le jeune Kepler put avoir accès à un ensemble précieux de nouvelles données d'observation, impressionnantes de par leur nombre

¹⁴ Cf. *Opera omnia*, I, p. 108 ; *Le secret du monde*, Ancienne préface, p. 36.

¹⁵ *Le secret du monde*, Ancienne préface, p. 31.

¹⁶ Pour la réception de l'héliocentrisme à l'époque, cf. MARTENS (2000), pp. 18-32.

et leur exactitude. En outre, à la mort de Tycho Brahe, un an plus tard, Kepler allait le remplacer à titre de *mathematicus* impérial, et ce, pour les onze années subséquentes. Mais au-delà de cette valeur historique¹⁷, cette œuvre peut être conçue comme le point de départ de toute son entreprise scientifique.

Le fait que Kepler ait lui-même réédité le *Mysterium cosmographicum* vingt-cinq ans après sa première parution est déjà le signe, chez lui, d'un attachement durable envers cette œuvre. Mais surtout, les nombreuses annotations propres à cette seconde édition nous permettent de voir non seulement comment Kepler a critiqué son premier ouvrage – essentiellement à la lumière de son *Harmonice mundi*¹⁸ – mais aussi à quel point il a pu y demeurer fidèle, du moins quant aux *a priori*. Il nous semble donc pertinent d'étudier à la fois ces questions directrices et ces présupposés métaphysiques puisqu'ils ont jalonné la voie que le scientifique allait emprunter dans ses recherches concernant les mouvements célestes. C'est d'ailleurs l'opinion de Kepler, comme il l'écrit lui-même dans la Dédicace de la seconde édition du *Mysterium cosmographicum*:

et au cours de ces vingt-cinq dernières années, alors que j'étais occupé à tisser la toile de la restauration de l'Astronomie [...], ces chapitres [*sc.* ceux du *Mysterium cosmographicum*] m'ont plus d'une fois éclairé le chemin. Enfin, presque tous les livres d'astronomie que j'ai publiés depuis ce temps pourraient être rapportés à l'un ou à l'autre des principaux chapitres du présent ouvrage, parce qu'ils en contiennent soit l'explication soit l'accomplissement. Si je dis cela, c'est non pas par amour pour mes inventions (loin de moi, encore une fois, pareille folie), mais parce que j'ai appris par les choses elles-mêmes et par les observations absolument dignes de foi de Tycho Brahe, que l'on ne peut trouver aucune autre voie pour parvenir à la perfection de l'astronomie et à la certitude du calcul, aucune autre voie pour fonder la science **soit de la partie de la métaphysique relative au ciel soit de la physique céleste**, aucune autre voie, dis-je, que celle que j'ai, dans ce petit ouvrage, soit expressément indiquée soit esquissée au moyen d'opinions encore timides et à titre d'ébauche. J'invoque comme témoins de ce que je dis : d'une part, les *Commentaires*

¹⁷ Valeur dont nous entretient Kepler dans la 1^{ère} note sur l'ancienne dédicace. Cf. *Opera omnia*, I, pp. 100-101 ; *Le secret du monde*, Ancienne dédicace, note 1, pp. 27-28.

¹⁸ Linz, 1619.

sur la Planète Mars [i.e. l'*Astronomia nova*], publiés en 1609, ainsi que ceux que je conserve encore par-devers moi, sur les mouvements des autres planètes [...].¹⁹

La partie de l'extrait que j'ai soulignée montre à quel point Kepler ne pouvait concevoir l'astronomie, anciennement conçue comme étant essentiellement d'ordre géométrique, sans que deux volets importants soient impliqués: la métaphysique céleste, d'abord (que nous pourrions relier à la méthode *a priori*), présentant les causes véritables des mouvements des cieux ; la physique céleste, ensuite, intimement reliée à la première, énonçant les principes physiques régissant ces mêmes mouvements célestes, nous permettant ensuite d'en calculer les effets observables (cela pouvant être ramené éventuellement à la méthode *a posteriori*). C'est uniquement le second volet qui fut mis en lumière dans les premières études sérieuses consacrées à l'apport de Kepler pour l'astronomie et la physique modernes, tant chez les historiens des sciences que chez certains philosophes des sciences, faisant de lui un découvreur exemplaire ayant « vu » le parcours elliptique des planètes parmi les nouvelles données observationnelles de l'époque²⁰, tel un scientifique moderne cherchant à établir des lois physiques, sous forme d'équations mathématiques, afin de décrire les mouvements des corps terrestres et célestes. Néanmoins, une telle reconstruction s'est souvent faite au prix d'une réduction parfois inquiétante de la pensée képlérienne par le biais d'une ignorance volontaire du premier volet, dont les constituants furent jugés non scientifiques par les auteurs. Ces études semblent également passer à côté d'un aspect crucial pour la compréhension de la révolution scientifique : en mettant l'accent sur les découvertes, ils oublient l'importance de l'art de savoir poser les bonnes questions – par exemple : « qu'est-ce qui fait marcher les planètes ? »²¹ – et de s'intéresser aux paramètres qui allaient ensuite se révéler étonnamment

¹⁹ « et per hos 25 annos mihi telam pertextenti restorationis astronomiae [...] faciem non unam praetulerunt : denique quidquid fere librorum astronomicorum ex illo tempore edidi, id ad unum aliquod praecipuum capitulum hoc libello propositum referri potuit, cujus aut illustrationem aut integrationem contineret; non equidem amore mearum inventionum, absit iterum haec insania, sed quia rebus ipsis et observationibus Tycho Brahe fide omni dignissimis edoctus fui, nullam aliam inveniri posse viam ad perfectionem astronomiae certitudinemque calculi, nullam ad constituendam scientiam hujus **seu partis metaphysicae de coelo, seu physicae coelestis**, quam quae hoc libello vel expresse praescripta, vel timidis saltem opinionibus et rudi Minerva adumbrata esset. Testes sisto illic Commentaria Martis a. 1609 edita, quaeque adhuc domi premo Commentaria de motibus ceterorum planetarum [...]. » *Opera omnia*, I, pp. 102-103; *Le secret du monde*, Dédicace, trad. A. Segonds, pp. 13-14. Je souligne.

²⁰ Cf. SMALL ([1804] 1963), DREYER ([1906] 1953) et STRONG (1966). Pour une brève revue de la littérature képlérienne, cf. MARTENS (2000) pp. 5-6.

²¹ Koyré remarque avec justesse que cette question ne se posait pas pour l'astronomie médiévale et antique. Cf. KOYRÉ (1961), pp. 120-121.

féconds. À l'inverse, une autre tradition – popularisée par l'écrivain Arthur Koestler²² – a plutôt mis en évidence les aspects métaphysiques, voire ésotériques, de la démarche képlérienne, lesquels se rapprochent davantage du premier volet. Une telle approche a le mérite de capturer l'esprit de l'ensemble de l'œuvre képlérienne, rendant compte par là de la richesse singulière et de l'originalité de sa pensée ; néanmoins, elle m'apparaît souffrir du défaut inverse, faisant de ce penseur un « somnambule » ayant découvert, un peu par hasard et en dépit d'une démarche intellectuelle peu rationnelle, des lois régissant le mouvement céleste. Nous pouvons voir des traces de cette approche lorsque le philosophe Gérard Simon, bien qu'il reconnaisse la très grande fécondité des présupposés métaphysiques képlériens, les juge cependant éloignés de toute valeur scientifique : « Nous retrouvons ici une fois encore le rôle inducteur de **spéculations théoriques** en elles-mêmes **complètement dénuées de scientificité**, mais à l'usage se révélant singulièrement fructueuses. »²³ Kepler est pourtant clair dans l'extrait ci-dessus : ces deux volets sont indissociables de la science qu'il a révolutionnée. Et de fait, une étude attentive de sa démarche scientifique montre à quel point l'affirmation de Simon doit être nuancée : lesdites « spéculations théoriques » de Kepler font effectivement partie intégrante de sa pensée scientifique²⁴.

Un défi qui attend les commentateurs de Kepler est de comprendre cet itinéraire rationnel particulier ayant mené à la naissance de l'astrophysique moderne, et cela ne peut se faire sans passer par l'éclaircissement des rôles respectifs des volets métaphysique et « ouranophysique »²⁵ soulignés dans l'extrait précédent. À ce propos, le foisonnement des récentes études képlériennes va dans ce sens, en tentant de mettre de plus en plus en valeur l'importance de ces présupposés métaphysiques et de saisir leur rôle dans le processus ayant mené aux découvertes scientifiques de Kepler. Ainsi, une grande importance est maintenant attribuée aux aspects théologiques de son éducation²⁶ – laquelle le prédestinait à une carrière religieuse²⁷ – et à l'impact qu'ils ont pu avoir sur ses découvertes scientifiques. Toujours est-il

²² Dans son best-seller intitulé *The Sleepwalkers*. Cf. KOESTLER ([1959] 1989).

²³ SIMON (1979), p. 413. Je souligne.

²⁴ Cela sera montré tout au long de cette thèse.

²⁵ Je me permets ce néologisme pour faire référence à ce qui concerne la physique céleste. Depuis l'antiquité, les principes étudiés à l'intérieur de la physique céleste avaient été conçus comme étant nécessairement différents de ceux prescrits par la physique terrestre, suite à la tradition aristotélicienne qui sépare radicalement les mondes sublunaire et supralunaire.

²⁶ Cf. METHUEN (1998), BARKER et GOLDSTEIN (2001), KOZHAMTHADAM (1994).

²⁷ Pour les détails biographiques, l'ouvrage de référence demeure encore celui de Max CASPAR ([1959] 1993).

que ces deux volets, nous dit Kepler, se rapportent à la voie indiquée dans son premier ouvrage. Mais avant de voir en quoi consiste exactement cette voie, il convient de voir si et comment Kepler tient compte, dans son *Astronomia nova*, des arguments exposés dans son *Mysterium cosmographicum*.

Kepler en fait mention dès l'introduction, alors qu'il s'interroge au sujet de la source du mouvement des corps célestes en se demandant notamment si la Terre met en mouvement le Soleil autour d'elle, ou au contraire si c'est le Soleil qui meut la Terre :

La **nature des choses** ne crie-t-elle pas à haute voix que le circuit dans lequel ces 365 jours sont employés occupe également un lieu intermédiaire entre ceux de Mars et de Vénus autour du Soleil, et qu'ainsi il encercle lui-même le Soleil, et donc, que ce circuit en est un de la Terre autour du Soleil, et non du Soleil autour de la Terre ? Mais ces choses sont néanmoins **plus appropriées** à mon *Mysterium cosmographicum*, et les arguments qui ne seront pas répétés dans cet ouvrage n'ont pas à être introduits ici.²⁸

Dans ce passage, Kepler renvoie explicitement le lecteur aux arguments métaphysiques du *Mysterium cosmographicum*, jugeant les explications issues de la « nature des choses » non appropriées à la tâche qu'il entend remplir dans son *Astronomia nova*. Il est bien important de noter qu'ils n'en sont pas moins valides. Si certains croient voir là une coupure nette de Kepler face à ses recherches *a priori*, jugées ici moins « appropriées » dans le cadre d'une conquête du mouvement de la planète Mars, je crois qu'il ne faut y voir rien de plus qu'une simple prise de conscience de la double tâche de l'astronomie. Il est même particulièrement révélateur qu'à ce stade-ci, en guise d'introduction à cet ouvrage majeur où Kepler perçoit, en quelque sorte, le secret de l'orbite de Mars, Kepler ne rejette nullement ses recherches métaphysiques. La « nature des choses » explique bel et bien *a priori* la configuration des cieux, mais il faut procéder également à une recherche *a posteriori*, à partir des données d'observation. Prendre soin de distinguer ces deux approches ne signifie aucunement que l'effectuation de la seconde entraîne le rejet de la première, et encore moins que la seconde soit la seule façon de parvenir à un résultat valable scientifiquement. C'est pourquoi je suis plutôt d'accord, quoique de façon

²⁸ « an non alta voce exclamat **rerum natura**, circuitum, in quo consumuntur isti dies 365, loco etiam medium esse inter circuitus Martis et Veneris circa Solem, et sic ipsum quoque circa Solem, Terrae igitur esse hunc circuitum circa Solem, non Solis circa Terram ? Sed haec sunt **magis propria** Mysterii mei Cormographici, nec erant commemoranda hic alia argumenta, quam quae pertractantur in hoc opere. » *Opera omnia*, III, p. 150 ; *Astronomia nova*, Introduction, p. 53 (ma traduction). Je souligne.

nuancée, avec la proposition de W. Diederich, qui décrit la relation entre les trois œuvres les plus marquantes de Kepler en proposant ce schéma : « MC + AN = HM »²⁹ (où MC, AN et HM renvoient aux recherches présentées respectivement dans le *Mysterium cosmographicum*, l'*Astronomia nova* et l'*Harmonice mundi*). Dans cette formulation, on peut voir que les deux œuvres principales dont je traite dans ce chapitre sont mises en commun (donc conservées toutes deux) et mènent ensemble à un système plus élaboré, harmonique. Mon accord est toutefois nuancé puisque je ne crois pas non plus qu'il faille y voir une somme statique trouvant son résultat final dans l'*Harmonice mundi* ; je crois plutôt que les parties de l'addition (ainsi que la somme), que Diederich fait bien de conserver toutes deux, renvoient à des approches qui s'influencent, de façon dynamique, afin de répondre à des questions communes.

À deux autres endroits de l'*Astronomia nova* (chapitre 22 et chapitre 32), Kepler cite explicitement le *Mysterium cosmographicum*, afin de revenir sur des questions qu'il y avait laissé ouvertes dans le chapitre 22 de son *primum opus*, chapitre se penchant sur les mouvements des astres et ayant permis à l'astronome d'effectuer ses premiers pas vers une première version de ce qui allait devenir la fameuse loi des aires (seconde loi de Kepler). Dans ce chapitre 22 (qui se situe vers la fin du *Mysterium cosmographicum*, qui en contient 23) Kepler s'adressait à lui-même une objection puisque son système expliquant la vitesse des planètes semblait faire une exception pour le mouvement de la Terre autour du Soleil, de même que pour les planètes inférieures (soit Mercure et Vénus), qui ne semblaient pas requérir de point équiant (c'est-à-dire de point hors du Soleil à partir duquel la planète a une vitesse angulaire constante)³⁰. Kepler se montrait fort embêté : ayant proposé une justification physique de la nécessité d'un point équiant, comment expliquer que la Terre en soit privée ? Il concluait alors ce chapitre en ces termes : « Pourtant, je voudrais avertir ces astronomes que **rien n'est parfait sous tout rapport**. [...] C'est pourquoi ce **différend incertain** doit demeurer, lui aussi, devant le tribunal de l'Astronomie. »³¹ Il est intéressant de remarquer que ce manque de concordance entre son système et les données de l'époque ne lui font pas rejeter

²⁹ DIEDERICH (2001), p. 18.

³⁰ À noter que Copernic, dans son système héliocentrique, fait coïncider le point équiant avec le centre de l'orbe terrestre, ce qui revient à supprimer le point équiant.

³¹ « Sed tamen eos admonitos velim, **nihil esse ex omni parte beatum**. [...] Quare et haec **incerta lis** sub astronomo iudice pendeat. » *Opera omnia*, I, p. 183 ; *Le secret du monde*, XXII, trad. A. Segonds, p. 186 (traduction modifiée). Je souligne.

son système pour autant. L'avenir lui donnera raison puisque dans le chapitre 22 de l'*Astronomia nova*, Kepler revient sur ce problème en affirmant que les nouvelles données ont finalement confirmé son intuition selon laquelle la Terre avait son point équant :

Dans le chapitre 22 du *Mysterium cosmographicum*, alors que je donnais la cause physique de l'équant ptoléméen ou du second épicycle copernicien-tychonien, je me suis fait une objection à la fin du chapitre : que si la cause que je proposais avait été authentique, elle aurait dû valoir universellement pour toutes les planètes. Or puisque la Terre, l'un des astres (selon Copernic), ou le Soleil (selon le reste) n'avait pas encore eu besoin de cet équant, j'ai décidé de laisser **incertaine** cette **spéculation**, jusqu'à ce qu'elle soit plus évidente pour les astronomes. **J'ai néanmoins entretenu le soupçon que cette théorie aurait aussi son équant**. Après que j'eusse été connu de Tycho, ce soupçon fut **confirmé par moi**.³²

Ce passage met bien en évidence que les données observationnelles, à l'époque du *Mysterium cosmographicum*, n'étaient pas jugées suffisamment précises et nombreuses pour permettre de rejeter les spéculations et d'infirmer le modèle malgré le fait qu'elles ne concordent pas avec ce dernier. Ce n'est qu'après avoir eu connaissance des nouvelles données de Tycho Brahe que Kepler put obtenir des données qui confirmèrent ses soupçons. Le chapitre 32 de l'*Astronomia nova* revient sur ce point, affirmant que les données permettent maintenant de poser la cause du point équant comme étant « juste et légitime » :

Alors donc que dans mon *Mysterium cosmographicum*, publié il y a huit ans (maintenant davantage), j'ai remis à plus tard le procès de la cause de l'équant ptoléméen, pour la seule raison qu'il **ne pouvait pas être dit, à partir de l'astronomie ordinaire**, si le Soleil ou la Terre utilisait un point équant et avait son excentricité bissectée. Certes maintenant il est convenable que la chose soit claire, comme nous avons la **confirmation par le témoignage d'une astronomie plus sûre**, qu'il y a tout à fait un équant dans la théorie du Soleil ou de la Terre. Ceci ayant été démontré, dis-je, il est convenable d'accepter comme **juste et légitime** la

³² « In Mysterio Cosmographico cap. XXII cum physicam causam aequantis Ptolemaici vel secundi epicycli Copernico-Tychonici redderem, mihi ipsi objeci in fine capituli : quod, si causa a me allata genuina esset, omnino per omnes planetas valere debuerit. Cum autem Tellus, una ex sideribus (Copernico), vel Sol (reliquis), aequantem hoc hactenus non indigerit, **speculationem** illam **incertam** esse volui, quoad astronomis amplius linqueret. **Suspicionem tamen concepi, fore et huic theoriae suum aequantem**. Postquam in Tychonis notitiam veni, suspicio haec **in me confirmata** fuit. » *Opera omnia*, III, p. 267 ; *Astronomia nova*, XXII, pp. 305-306 (ma traduction). Je souligne.

cause de l'équant ptoléméen, assignée par moi dans le *Mysterium cosmographicum*, puisqu'elle est **universelle et commune** à toutes les planètes.³³

Kepler est satisfait d'avoir une preuve par le témoignage de l'observation, *a posteriori* ; mais nous voyons bien, dans cet extrait, que la cause du point équant sera acceptée comme « juste et légitime » non pas simplement en vertu de cette confirmation empirique, mais étant donné que ce principe devient universel. C'est là quelque chose qu'il faudra garder en tête lorsque nous analyserons l'*Astronomia nova*, et qui nous donne un autre indice que Kepler ne rejette pas les raisons *a priori* qui le guidaient dans son premier ouvrage, et qui sont les mêmes évoquées (dans ce cas-ci : le besoin d'avoir un système universel), que ce soit pour rejeter ou pour accepter le modèle suggérant la cause du point équant (à savoir, le Soleil comme source du mouvement)³⁴.

Sur le plan de la découverte scientifique, il est également très intéressant de constater que la seconde loi des aires, élaborée dans l'*Astronomia nova*, trouvait bien ses fondements dans son *primum opus* où une forme primitive de cette dernière pouvait être proposée et survivre malgré les données de l'époque qui semblaient l'infirmier. Kepler note lui-même, dans la seconde édition du *Mysterium cosmographicum*, que ce « différend incertain » a été réglé dans l'*Astronomia nova* et que non seulement cela valide ce qui était présent dans son premier ouvrage, mais que tous les éléments de sa nouvelle astronomie peuvent y trouver leur origine :

Tu vois donc, Lecteur studieux, que dans ce petit livre [*sc.* le *Mysterium cosmographicum*] se trouvaient des **semences de toutes et de chacune** des choses nouvelles et généralement considérées comme absurdes, que, depuis ce temps, j'ai démontrées et établies **à partir des observations tout à fait certaines de Brahe** dans le domaine de l'**astronomie nouvelle** [...].³⁵

³³ « Cum ergo in Mysterio meo Cosmographico, aute annos octo (plures jam sunt) publicato, litem hanc de causa aequantis Ptolemaici hoc solo nomine distulerim, quod ex **astronomia vulgari dici non posset**, an etiam Sol vel Terra punco aequatorio et ejus eccentricitas bisectione utatur : equidem jam decet rem esse liquidam, postquam **sincerioris astronomiae testimonio confirmatum** habemus, omnino in theoria Solis vel Terrae aequantem inesse. Hoc inquam jam demonstrato, decet causam aequantis Ptolemaici a me assignatam in Mysterio Cosmographico pro **justa et legitima** haberi, cum sit **universalis et communis** omnibus planetis. » *Opera omnia*, III, p. 298 ; *Astronomia nova*, XXXII, p. 373 (ma traduction). Je souligne.

³⁴ Nous reviendrons sur ces étapes dans le chapitre 4 de cette thèse.

³⁵ « Vide itaque, lector studiose, libello hoc **semina** sparsa esse **omnium et singulorum**, quae ex eo tempore in **astronomia nova** et vulgo absurda ex **certissimis Brahei observationibus** a me constituta et demonstrata sunt [...]. » *Opera omnia*, I, p. 184 ; *Le secret du monde*, XXII, note 7, trad. A. Segonds, p. 187. Je souligne.

Cela met encore une fois en valeur le lien fort de continuité entre ces deux œuvres, du moins tel que perçu par leur auteur. C'est pourquoi il me semble primordial d'en tirer l'essentiel, en commençant par le projet qui le guide.

1.2. Le projet cosmographique

Le projet de Kepler est annoncé dès le titre de son ouvrage, qui sous sa forme longue, se présente ainsi : « *Prodomus dissertationum cosmographicarum, continens mysterium cosmographicum de admirabili proportione orbium coelestium : deque causis coelorum numeri, magnitudinis, motuumque periodicorum genuinis et propriis, demonstratum per quinque regularia corpora geometrica.* »³⁶ soit « Prologue aux dissertations cosmographiques, contenant le mystère cosmographique, relatif à l'admirable proportion des orbites célestes et aux causes authentiques et propres du nombre des cieux, de leur grandeur et de leurs mouvements périodiques, démontré par les cinq corps géométriques réguliers ». Ce titre est absolument admirable en ce qu'il résume parfaitement le projet de Kepler : chaque mot est soigneusement choisi et reflète les intentions de l'auteur. Avant d'en éclairer le sens, précisons que, comme nous l'avons vu dans les extraits précédents, Kepler y fait par la suite référence sous une forme courte, « *Mysterium cosmographicum* », et c'est ainsi que je le nommerai pour la suite de cette thèse. À noter que j'ai toujours trouvé étrange, sinon critiquable, que certains commentateurs, plutôt que de traduire le titre littéralement par « *Mystère cosmographique* »³⁷, préfèrent traduire le terme « *Mysterium* » par « Secret ». C'est le cas notamment d'Alain Segonds qui a intitulé sa traduction de cette œuvre – traduction excellente par ailleurs, et richement commentée – *Le secret du monde*³⁸ ; quelques années auparavant, pour sa traduction anglaise, Duncan avait employé plus ou moins la même formule, *The Secret of the Universe*³⁹. L'historien des sciences Jean-Pierre Verdet loue ce choix : « Nous souscrivons totalement à la nuance d'Alain Segonds qui traduit *mysterium* par *secret* »⁴⁰ sous prétexte qu'un secret peut être dévoilé, contrairement à un mystère – par

³⁶ *Opera omnia*, I, p. 95.

³⁷ Comme le fait bien, par exemple, Gérard SIMON (1979).

³⁸ Cf. KEPLER ([1596/1621] 1984), trad. A. Segonds.

³⁹ Cf. KEPLER ([1596/1621] 1981), trad. A.M. Duncan.

⁴⁰ VERDET (1990), p. 123.

exemple, celui de la trinité – qui demeurera toujours tel. Pour ma part, je souscris plutôt à l’opinion de Peter Barker et Bernard Goldstein, qui remarquent avec justesse l’importante dimension sacrée impliquée dans le terme original :

But “secret” is a bland translation of *mysterium*. The term may well mean “mystery” or “secret” but its central meaning in antiquity was “sacred mystery” the secrets taught to initiates when they entered a religious cult. So the title might be better rendered “The Sacred Mystery of the Cosmos.”⁴¹

Le « mystère » est effectivement un terme religieux, que Kepler assume entièrement : pratiquer l’astronomie, selon lui, c’est retrouver la trace divine dans la création⁴². Comprendre véritablement le monde requiert de répondre à des questions comme celles-ci, que Kepler communique dans sa salutation au lecteur qui suit directement sa page titre : « Qu’est-ce que le monde ? Qu’est-ce qui a amené Dieu à créer et selon quel plan? D’où Dieu a-t-il tiré les nombres? Quelle règle gouverne une masse aussi énorme ? Pourquoi Dieu a-t-il créé six circuits? »⁴³ Ces questions peuvent trouver leur réponse dans la science, selon Kepler, mais elles n’en demeurent pas moins tributaires d’un certain « mystère » ; une fois résolues, elles demeureront fortement reliées à leur dimension divine, d’où le mystère perpétuel – contrairement à un secret qui, une fois révélé, n’en est plus un. Un autre problème, selon moi, est d’avoir remplacé l’adjectif « *cosmographicum* », terme pourtant employé deux fois dans le long titre original, par « du monde » ou « of the universe ». La cosmographie est pourtant un concept central pour Kepler, du moins dans cet ouvrage ; il convient d’en éclairer maintenant le sens.

Tout au long de cet ouvrage, Kepler défend vigoureusement l’héliocentrisme de Copernic, le « meilleur observateur du monde »⁴⁴. Mais ce faisant, il soutient à plusieurs reprises qu’il y a divergence quant à leurs motivations scientifiques: alors que Copernic aurait cherché un modèle qui permette de prédire avec de plus en plus de précision les positions exactes des corps célestes, Kepler serait plutôt en quête d’un modèle qui puisse fournir, comme l’indiquait le titre dans sa version longue, les « causes authentiques et propres » de ces

⁴¹ BARKER et GOLDSTEIN (2001), p. 99.

⁴² Nous reviendrons sur cette dimension importante au chapitre 3 de cette thèse, à la section 3.1.

⁴³ « Quid mundus, quae causa Deo ratioque creandi, Unde Deo numeri, quae tantae regula moli, Quid faciat sex circuitus [...] » *Opera omnia*, I, p. 96 ; *Le secret du monde*, trad. A. Segonds, p. 12.

⁴⁴ « melior mundi speculator ». *Opera omnia*, I, p.96.

données d'observation. C'est au début du chapitre 15 que Kepler nous éclaire sur la distinction entre la cosmographie et l'astronomie :

l'intention de Copernic n'est pas de s'occuper de **cosmographie** mais d'**astronomie**; autrement dit, peu lui importe de commettre quelque faute contre la **proportion véritable des orbés**, pourvu qu'il détermine, à partir des observations, les valeurs les plus aptes à permettre la démonstration des mouvements et le calcul de la position des planètes, dans la mesure où cela est possible.⁴⁵

En quoi la cosmographie se distingue-t-elle de l'astronomie? Et ne doit-elle pas, elle aussi, s'accorder avec les faits observés? Oui certes, mais pour Kepler, la cosmographie est une discipline mixte, ne recherchant pas tant l'exactitude d'une description de faits – c'est là la tâche des astronomes, pour qui les mathématiques sont quasi-instrumentales⁴⁶ – que leur réunion au sein d'un système harmonieux, et par là, leur explication véritable. C'est en ce sens que la cosmographie « se distingue par son caractère élémentaire et moins rigoureux »⁴⁷ des autres disciplines scientifiques : car elle vise à rendre compte des observations d'un point de vue holiste, en les expliquant de telle sorte que les phénomènes puissent être compris comme des conséquences nécessaires d'un système justifié *a priori*.

Dès la préface, Kepler nous parle de cette distinction par rapport à Copernic, cette fois-ci eu égard à leurs procédés démonstratifs : « J'en étais même venu à assigner aussi à la Terre le mouvement du Soleil, mais alors que Copernic le fait à partir de raisons **mathématiques**, je le faisais à partir de raisons **physiques** ou, mieux encore, **métaphysiques**. »⁴⁸ Nous pouvons donc résumer la distinction proposée dans le *Mysterium cosmographicum* de cette façon : la cosmographie vise à trouver les véritables causes des mouvements, par le biais de la physique ou de la métaphysique (deux disciplines *a priori*, volet réaliste) ; l'astronomie vise à reconstruire les mouvements pour fins de calcul, par le biais de raisons mathématiques

⁴⁵ « Copernici intentum non in **cosmographia** versari, sed in **astronomia** : hoc est, utrum nonnihil in **veram orbium proportionem** peccet, parum ipsi curae est, modo numeros ex observationibus eos constituat, qui sint ad demonstrandos motus planerumque loca computanda, quantum fieri potuit maxime apti. » *Opera omnia*, I, p. 153; *Le secret du monde*, XV, trad. A. Segonds, p. 129. Je souligne.

⁴⁶ Nous reviendrons sur ce changement par rapport à la tradition astronomique dans le chapitre 3 de cette thèse.

⁴⁷ Note 1 de A. Segonds dans KEPLER ([1596/1621] 1984), p. 202.

⁴⁸ « Jamque in eo eram, ut eidem etiam Telluri motum Solarem, ut Copernicus **mathematicis**, sic ego **physicis**, seu mavis, **metaphysicis** rationibus ascriberem. » *Opera omnia*, I, p. 106; *Le secret du monde*, Ancienne préface, trad. A. Segonds, p. 31.

(reconstructions *a posteriori*, volet instrumentaliste)⁴⁹. Ces deux disciplines, bien que différentes, n'en sont pas moins reliées : les raisons « métaphysiques » recherchées par Kepler sont celles qui permettent d'expliquer ce qui, chez Copernic, demeurait du ressort du calcul ; la justification de ce modèle devient alors complète. Le projet du *Mysterium cosmographicum* peut donc se comprendre comme étant celui d'intégrer et de réinterpréter les positions héliocentriques de Copernic à l'intérieur d'un système du monde *a priori*, expliquant que le monde soit ainsi et pas autrement.

Cette attitude épistémologique se traduit notamment dans les questions principales présentées dans le titre (alors qu'il cherche les causes du « nombre des cieux, de leur grandeur et de leurs mouvements périodiques »). Kepler les reprend une à une dans sa préface : « Et il y avait trois choses particulièrement dont je cherchais avec obstination pourquoi elles étaient ainsi et non pas autrement, à savoir : le nombre, la grandeur et le mouvement des orbes. »⁵⁰

Ces questions peuvent se reformuler ainsi :

- 1) Pourquoi existe-t-il un tel nombre (égal à six) de planètes?
- 2) Pourquoi sont-elles disposées à ces distances du Soleil?
- 3) Pourquoi se déplacent-elles à ces vitesses?

Nous le voyons bien, la cosmographie doit répondre non pas au « comment » mais au « pourquoi » (d'où le « comment » doit dériver) des proportions célestes observées ; c'est-à-dire qu'elle doit fournir les raisons propres qui puissent expliquer qu'il en soit ainsi et pas autrement. Pour produire des *explanantia* qui rendent compte adéquatement des *explananda* dans une perspective cosmographique, Kepler ne peut pas seulement se fonder sur l'expérience empirique ; il n'a d'autre choix que d'aller chercher des présupposés inspirés par la philosophie, la théologie et la métaphysique afin de trouver une justification *a priori* de ce que nous observons dans les cieux. Kepler croira avoir rempli cette tâche en proposant son système fondé sur les « cinq solides géométriques réguliers », dernier élément du titre qu'il nous reste à éclairer.

⁴⁹ Nous verrons, aux chapitres 2 et 3 de cette thèse, que cette distinction est présente dans les ouvrages subséquents de Kepler, bien que sous une dénomination différente.

⁵⁰ « Et tria potissimum erant, quorum ego causas, cur ita, non aliter essent, pertinaciter quaerebam, numerus, quantitas et motus orbium. » *Opera omnia*, I, p. 106; *Le secret du monde*, Ancienne préface, trad. A. Segonds, p. 31.

1.3. Un héliocentrisme plus fort que celui de Copernic

Mais avant d'exposer le premier modèle képlérien de l'univers, il convient tout d'abord de revenir à ce qui est probablement la conviction la plus importante pour Kepler, le point de départ qui justifie l'écriture de son *Mysterium cosmographicum* et qui le place en rupture avec la tradition : le centre du monde se situe dans le Soleil et non dans la Terre. Kepler se prononce en faveur du système héliocentrique de Copernic dès le premier chapitre, intitulé « Quelles raisons montrent que les hypothèses de Copernic sont raisonnables. Présentation des hypothèses de Copernic. »⁵¹ C'est l'astronome et professeur de mathématiques Michael Mästlin qui avait enseigné à Kepler, lors de ses années d'étude en théologie à l'université de Tübingen (1589-1594), non seulement le système ptoléméen (géocentrique), mais aussi le système copernicien (héliocentrique), dont il avait pris connaissance en lisant très attentivement le *De revolutionibus orbium cœlestium* (publié en 1543). Ce dernier ouvrage avait l'audace de proposer une vision du monde qui n'allait pas du tout de soi pour l'époque : affirmer que la Terre est mobile et se déplace autour du Soleil prêtait le flanc à de nombreuses critiques, tant scientifiques que fondées sur le simple bon sens (par exemple, nous ne sentons pas la Terre bouger). Pourtant, chez Kepler, placer le Soleil au centre du monde relève d'une évidence absolue : « Kepler est le premier très grand esprit pour qui l'héliocentrisme est une affaire réglée. »⁵²

Pour mieux saisir les raisons de ce choix si clairement exprimé, il faut préciser d'abord que selon Kepler, comprendre le monde revient à déchiffrer le livre de la nature (*liber naturae*)⁵³, que l'on peut mettre en correspondance avec l'autre livre, la Bible (*liber Scripturae*). Il n'y a pas de contradiction entre les deux, selon l'astronome, du moment qu'on les déchiffre correctement ; c'est pourquoi il précise dès le premier paragraphe de son chapitre que sa quête n'est pas à mettre en opposition avec ce qui se trouve dans la Bible : « Je promets

⁵¹ « Quibus rationibus Copernici hypotheses fiant consentaneae. Et explicatio hypothesisum Copernici. » *Opera omnia*, I, p. 112; *Le secret du monde*, I, trad. A. Segonds, p. 43.

⁵² SIMON (1979), p. 238.

⁵³ Cette expression était assez fréquente depuis le XIV^{ème} siècle et avait notamment été employée par Nicolas de Cues. C'est toutefois Galilée qui la rendrait fort populaire. Cf. Note 7 de A. Segonds dans KEPLER ([1596/1621] 1984), p. 209.

cependant, en général, de ne rien dire qui fasse injure aux Saintes Écritures [...]. »⁵⁴ Cette phrase n'est pas un simple artifice rhétorique visant à faire accepter son système aux yeux de ses contemporains ; au contraire, c'est pour des raisons essentiellement théologiques que Kepler adopte le modèle de Copernic, du moins tel qu'exprimé dans le *Mysterium cosmographicum*.

Une fois posé que le monde est comme un livre écrit par le Créateur, l'étape suivante est de poser une analogie, inspirée par Nicolas de Cues⁵⁵, entre le monde et la sphère trinitaire divine. Kepler remarque que la sphère avait déjà été adoptée comme forme du monde par Aristote et Copernic, en vertu de sa « noblesse »⁵⁶. Quant à l'aspect « trinitaire », il consiste dans le fait de voir qu'est exprimée dans le cercle, comme le remarquait Nicolas de Cues, la perfection de la trinité dans ces trois éléments qui sont instantanément reliés : le centre, le cercle et la surface du cercle. Kepler appliquera cette notion trinitaire à la sphère, où les trois éléments deviendront ceux-ci : le centre, la surface sphérique et le volume circonscrit par la sphère. La prochaine étape est de faire correspondre cette trinité exprimée par la sphère à la trinité divine (Dieu, Fils et Esprit saint). Or quelle place reviendra à Dieu, dans ce modèle ? Assurément le centre de la sphère. Cette correspondance va comme suit :

c'est que l'on trouve l'image du Dieu Un-trine dans la surface sphérique, à savoir l'image du **Père dans le centre**, celle du **Fils dans la surface** et celle de **l'Esprit dans l'uniformité de relation entre le point [central] et la circonférence**. Car les propriétés que le Cusain [*sc.* Nicolas de Cues] attribue au cercle, et que d'autres pourraient attribuer au globe, je les attribue, quant à moi, à la seule surface sphérique.⁵⁷

L'homologie entre la sphère du monde et la trinité divine permet également de situer l'être humain quant à sa nature corporelle, à savoir, dans une flèche reliant le centre à la surface sphérique; ainsi que l'âme, qui correspond alors au plan identifié par cette flèche, c'est-à-dire à un disque centré sur Dieu.

⁵⁴ « Illud in genere promitto, nihil me dicturum, quod in Sacras Literas injurium sit [...]. » *Opera omnia*, I, p. 112 ; *Le secret du monde*, I, trad. A. Segonds, p. 43.

⁵⁵ Nous reviendrons sur cette influence au chapitre 3 de cette thèse, à la section 3.2.

⁵⁶ *Opera omnia*, I, p. 123 ; *Le secret du monde*, II, trad. A. Segonds, p. 65. Je souligne.

⁵⁷ « Dei trinuni imago in sphaerica superficie, **Patris scilicet in centro, Filii in superficie, Spiritus in aequalitate 'schéséôs' inter punctum et ambitum**. Nam quae Cusanus circulo, alii forte globo tribuerent, ea ego soli sphaericae superficiae arrogo. » *Opera omnia*, I, p. 122; *Le secret du monde*, II, trad. A. Segonds, pp. 63-64. Je souligne.

La dernière étape de ce raisonnement consiste enfin à faire correspondre Dieu au Soleil ; par conséquent, le Soleil se situe bel et bien au centre du monde. Nous pouvons constater que cette analogie récupère le système héliocentrique copernicien en l'appuyant non pas sur les observations mais sur un raisonnement *a priori* : si le Soleil est au centre de l'univers, c'est parce qu'il est l'image divine de Celui qui gouverne le monde et parce que le centre est la place qui revient à un tel Dieu~Soleil :

De même donc que la source de la lumière est dans le Soleil, et le principe du cercle dans le lieu du Soleil, c'est-à-dire dans le centre, de même voici que la vie, le mouvement et l'âme du monde reviennent à ce même Soleil, de sorte qu'aux fixes appartient le repos, aux planètes l'acte second qu'est le mouvement, **au Soleil l'acte premier lui-même**, qui est incomparablement plus digne que les actes seconds en toutes choses, tout comme le Soleil lui-même l'emporte de très loin sur tous les autres [astres] par la beauté de son apparence, par l'efficacité de sa vertu et par la splendeur de sa lumière. C'est maintenant que ces attributs louangeurs reviennent à bien plus juste titre au **Soleil : Cœur du Monde, Roi, Empereur des étoiles, Dieu visible**, etc.⁵⁸

Le système héliocentrique prend maintenant tout son sens : la place qui revient au Soleil est le centre du monde, ce dernier devant être conçu comme une image de l'essence divine. Cette « quasi-localisation de Dieu dans le soleil »⁵⁹ – pour reprendre les mots du philosophe français Jean-Luc Marion – n'est pas sans nous rappeler les propos de Copernic lui-même dans son ouvrage *De revolutionibus orbium cælestium* :

Le Soleil demeure dans le vrai milieu de tout. En effet, dans ce très beau temple, qui donc placerait ce luminaire en un lieu autre ou meilleur que celui d'où il peut tout illuminer en même temps? Puisque ce n'est pas improprement que certains l'appellent la lampe du monde, d'autres l'esprit, d'autres le gouverneur. Trimégiste [l'appelle] Dieu visible, l'Électre de Sophocle [l'appelle] celui qui porte son regard

⁵⁸ « Sicut igitur fons lucis in Sole est, et principium circuli in loco Solis, scilicet in centro : ita nunc vita, motus et anima mundi in eundem Solem recidit : ut ita fixarum sit quies, planetarum actus secundi motuum, **Solis actus ipse primus**, qui incomparabiliter nobilior est actibus secundis in rebus omnibus : non secus atque Sol ipse et speciei pulchritudine, et virtutis efficacia, et lucis splendore ceteris omnibus longe praestat. Hic jam longe rectius **in Solem** competunt illa nobilia epitheta, **Cor mundi, Rex, Imperator stellarum, Deus visibilis**, et reliqua. » *Opera omnia*, I, p. 174 ; *Le secret du monde*, XX, trad. A. Segonds, p. 169 (traduction légèrement modifiée).

⁵⁹ MARION (1981), p. 195. L'auteur y développe la signification théologique de l'assimilation Dieu~Soleil.

sur tout. Vraiment ainsi, comme demeurant sur un trône royal, le Soleil gouverne la famille des Astres qui a son mouvement autour de lui.⁶⁰

L'interprétation de ce célèbre passage ne fait pas l'unanimité parmi les commentateurs. Certains, comme le philosophe Alexandre Koyré, voient dans cette métaphore un élément majeur des fondements de la pensée copernicienne : « Et c'est là la raison – la véritable raison – qui inspire la pensée et l'âme de Copernic »⁶¹ ; d'autres n'y voient qu'un élément rhétorique, visant à montrer au lecteur que cette idée n'est pas si novatrice⁶². Il n'en demeure pas moins que l'idée d'accorder un statut particulier au Soleil en vertu de sa lumière et de sa noblesse n'était pas en soi nouvelle. Elle était déjà présente, par exemple, chez Proclus dans son *Hymne au Soleil* (dont Kepler s'entretient au chapitre 20 du livre V de son *Harmonice mundi*).

Toujours est-il que, chez Copernic, cette métaphore ne sera pas aussi approfondie que chez Kepler. Cela est particulièrement manifeste dans le chapitre 15 du *Mysterium cosmographicum* : Kepler reproche à Copernic d'avoir utilisé, dans ses calculs, la position moyenne du Soleil (*Sol medius*)⁶³ et non sa position réelle (*Sol apparens*), tel qu'il nous apparaît. Kepler voit là un vestige de Ptolémée, pour qui le centre du monde était la Terre; ce qui revient au même que de placer le centre du monde au milieu de l'orbite terrestre, comme le fait Copernic. Kepler tient fortement à ce que tous les calculs se fassent selon ce qu'il appelle le « Soleil vrai », et c'est son maître Michael Mästlin qui se charge de la tâche colossale de calculer à nouveau toutes les distances. En quelque sorte, nous pourrions dire avec raison que Kepler est encore plus héliocentrique que Copernic et ce, dès son premier ouvrage.

L'analogie de la sphère trinitaire est d'une importance capitale pour comprendre la position héliocentrique inhérente à l'ensemble de l'œuvre képlérienne. Ceci dit, l'astronome tempère sa confiance en un tel procédé analogique. Ainsi nous prévient-il avant l'emploi d'une autre analogie : « Maintenant, Lecteur bienveillant, permets-moi de jouer pour quelque temps

⁶⁰ « In medio uero omnium residet Sol. Quis enim in hoc pulcherimo templo lampadem hanc in alio vel meliori loco poneret, quam unde totum simul possit illuminare. Siquidem non inepte quidam lucernam mundi, alii mentem, alii rectorem vocant. Trimegistus visibilem Deum, Sophoclis Electra intuente omnia. Ita profecto tanquam in solio regali Sol residens circum agentem gubernat Astrorum familiam. » COPERNIC ([1543] 1966), *De revolutionibus orbium coelestium : libri VI*, I, p. 9 (ma traduction). Je souligne.

⁶¹ KOYRÉ (1961), p. 69.

⁶² Pour plus de détails sur cette controverse et sur l'héliolâtrie, cf. HALLYN (1987), pp. 139-160.

⁶³ Dans le système de Copernic, le Soleil et le centre de l'orbite terrestre ne coïncident pas tout à fait. C'est la deuxième option que Copernic pose comme véritable centre du monde.

dans une affaire aussi sérieuse, et d'avoir quelque peu recours aux allégories. »⁶⁴ Kepler est-il vraiment sincère lorsqu'il nous parle d'un simple « jeu »? En un sens, oui, car il rompt ici avec la tradition : l'analogie pure et simple, non raisonnée, est sans valeur argumentative⁶⁵. Mais si un scientifique comme Kepler les utilise abondamment, c'est parce qu'elle peut aussi avoir un certain pouvoir explicatif, lorsque l'on a bien démontré que les deux termes de l'analogie sont reliés et pourquoi ils le sont. Son attitude face aux symboles est clairement exposée dans ce passage d'une lettre à Joachim Tanckius, en 1608 :

Oui certes je joue avec les symboles, et j'ai préparé un petit ouvrage : « Cabale géométrique », qui est au sujet des idées des choses naturelles en géométrie; **mais je joue de telle sorte que je n'oublie pas que je joue**. Car rien n'est prouvé par des symboles, rien de caché en philosophie naturelle n'est découvert par des symboles géométriques, ils représentent seulement des choses déjà connues ; à moins que l'on ne démontre, par des raisons sûres, que ce ne sont pas seulement des représentations symboliques, mais qu'on a ainsi décrit les modes et les causes de la connexion entre telle chose et telle autre chose [*sc.* les deux termes de l'analogie].⁶⁶

Si elle est bien employée, l'analogie prend toute son importance puisqu'elle permet de remonter aux causes premières, aux origines, à la création, ce qui est le propre d'une explication scientifique pleinement satisfaisante aux yeux de Kepler. Nous verrons plus loin⁶⁷ que Kepler reprochera d'ailleurs aux Hermétiques d'en être restés à une pure correspondance symbolique entre les choses, en oubliant d'en démontrer les liens et leurs causes.

Malgré la grande force du lien unissant ses parties, cette analogie Dieu~Soleil ne sera pas poussée au point d'en faire une identité. Cela évitera à Kepler de tomber dans des croyances païennes adorant le Soleil, comme le remarque justement Pauli :

[...] Kepler rapporte la Trinité à la tridimensionalité de l'espace et considère le Soleil et les planètes comme une reproduction moins parfaite du symbole abstrait de

⁶⁴ « Patere nunc, lector aequanime, ut ludam aliquantisper in re seria, et nonnihil allegoriis indulgeam. » *Opera omnia*, I, p. 128; *Le secret du monde*, IV, trad. A. Segonds, p. 76.

⁶⁵ C'est ce que Gérard Simon appelle le « refus de l'immotivé ». Cf. SIMON (1979), p. 121.

⁶⁶ « Ludo quippe et ego symbolis et opusculum institui : "cabbalam geometricam" quae est de ideis rerum naturalium in geometria; **sed ita ludo, ut me ludere non obliviscar**. Nihil enim probatur symbolis, nihil abstrusi eruitur in naturali philosophia per symbolas geometricas, tantum ante nota accommodantur; nisi certis rationibus evincatur, non tantum esse symbolica, sed esse descriptos connexionis rei utriusque modos et causas. » *Opera omnia*, I, p. 378 (ma traduction). Je souligne.

⁶⁷ À la section 3.2 de cette thèse.

la sphère. Grâce à cette interprétation, liée à l'idée des analogies, il demeure dans la foi chrétienne, **évitant le culte païen d'Hélios.** »⁶⁸

Cette accusation d'impiété aurait été grave non seulement aux yeux de ses contemporains, mais à ses propres yeux : Kepler, théologien de formation, ne saurait spatialiser réellement Dieu dans le monde. Il a toutefois cette conviction profonde que le monde est à l'image de Dieu, conviction qui sera supportée par un ensemble de présupposés qui seront réunis sous la forme d'une théorie qu'adoptera Kepler tout au long de ses recherches : la théorie des archétypes mathématiques, exprimée pour la première fois dès le *Mysterium cosmographicum*.

1.4. La théorie des archétypes mathématiques

Cette théorie aura une très grande importance⁶⁹ pour les recherches de Kepler puisqu'elle lui permettra de concevoir et de justifier l'idée que l'astronomie est une science fondée sur la physique où les propriétés essentielles des objets doivent être recherchées au sein des mathématiques – plus précisément, de la géométrie. Je vais exposer ici les principales thèses et les arguments de cette théorie tels que présentés dans le *Mysterium cosmographicum* ; nous en verrons les inspirations (essentiellement pythagoriciennes et néoplatoniciennes) et les conséquences sur l'astronomie nouvelle au chapitre 3 de cette thèse.

Une formulation claire et complète de cette théorie se trouve dans la seconde édition du *Mysterium cosmographicum*, dans une note de Kepler au chapitre 11, où il affirme que Dieu, qui a créé le monde à son image, n'a pu le faire qu'en suivant un modèle. Or ce modèle ne peut être autre que celui des réalités mathématiques :

[...] Voici que depuis vingt-cinq ans je tire profit de ce principe, dont j'étais alors déjà très fermement persuadé, à savoir que les êtres mathématiques sont les causes des réalités naturelles [...] parce que **Dieu le Créateur a, de toute éternité, avec lui-même les réalités mathématiques comme des archétypes**, dans une abstraction extrême et digne de Dieu, à partir des quantités elles-mêmes, considérées comme une matière. Aristote a nié le Créateur et soutenu que le monde était éternel : rien d'étonnant, dès lors à ce qu'il ait rejeté les

⁶⁸ PAULI ([1952] 2002), p. 57. Je souligne.

⁶⁹ Les archétypes sont malheureusement parfois écartés des analyses de l'œuvre de Kepler puisqu'ils seraient non proprement scientifiques. Rhonda MARTENS (2000) a le mérite d'en rétablir l'importance pour la naissance de la nouvelle astronomie.

archétypes; j'avoue, en effet, qu'ils n'auraient jamais eu aucune efficace **si Dieu lui-même n'avait pas tourné son regard vers eux dans la Création.**⁷⁰

Les régularités mathématiques que l'on observe physiquement sont donc présentes en tant que quantités matérialisées par Dieu lors de la création. Et c'est parce que les « êtres mathématiques » ont servi de modèle à Dieu lors de la création que les questions cosmographiques trouveront leurs réponses à l'intérieur des mathématiques.

Pour Kepler, cette conception relève d'un point de départ sûr et non démontrable. Ce présupposé théologique est assurément essentiel pour justifier *a priori* que le monde soit ordonné de façon mathématique et il sera présent tout au long des recherches képlériennes. Quant au contenu précis de ces recherches, il variera ; mais que Kepler propose un modèle fondé sur les polyèdres (*Mysterium cosmographicum*), une description d'une loi reliant les planètes à leur distance au Soleil (*Astronomia nova*) ou un système fondé sur des recherches harmoniques (*Harmonice mundi*), cette conviction d'un monde mathématique par essence ne sera jamais abandonnée.

Mais revenons aux recherches du *Mysterium cosmographicum*. Un autre pas restait à faire : comment les mathématiques pourraient-elles permettre de répondre précisément aux trois questions cosmographiques relevées plus haut, c'est-à-dire non pas simplement décrire, par exemple, la disposition des cieux mais expliquer que telle planète soit à telle distance du Soleil?

Kepler commence en procédant par tâtonnement numérique. D'entrée de jeu, après quelques essais infructueux, Kepler note l'inefficacité d'une approche numérique pour trouver un lien qui puisse rendre compte de la disposition précise des six orbes planétaires. Cette approche n'est pas non plus féconde pour la première question cosmographique que Kepler se pose : « je ne pouvais faire de conjecture à partir de la noblesse d'aucun nombre afin d'expliquer pourquoi, au lieu d'un nombre infini, si peu de mobiles existent. »⁷¹ Invoquer une

⁷⁰ « Ecce ut foeneraverit mihi per hos 25 anno principium jam tunc firmissime persuasum : ideo scil. mathematica causas fieri naturalium (quod dogma Aristoteles tot locis vellicavit), quia **Creator Deus mathematica ut archetypus secum ab aeterno habuit** in abstractione simplicissima et divina, ab ipsis etiam quantitibus, materialiter consideratis. Aristoteles Creatorem negavit, mundum aeternum statuit : non mirum, si archetypus rejecit : fateor enim nullam illis vim futuram fuisse, **si non Deus ipse in illos respexisset in creando.** » *Opera omnia*, I, p. 136; *Le secret du monde*, XI, note 2, trad. A. Segonds, p. 95. Je souligne.

⁷¹ « Neque enim ab ullius numeri nobilitate conjectari poteram cur pro infinitis tam pauca mobilia extitissent. » *Opera omnia*, I, p. 107; *Le secret du monde*, Ancienne préface, trad. A. Segonds, p. 33.

éventuelle « sainteté du sénaire »⁷² pour expliquer qu'il y ait six planètes n'est pas une explication scientifique acceptable à ses yeux, car il est invraisemblable qu'un quelconque pouvoir puisse être attribué à un nombre comme tel⁷³.

Suite à une inspiration, Kepler tente ensuite une recherche à l'intérieur de la géométrie, ce qui lui semble beaucoup plus approprié pour étudier des distances. D'ailleurs, n'est-ce pas plus vraisemblable que Dieu ait créé le monde, qui se déploie dans un espace continu, à l'image de réalités mathématiques géométriques plutôt qu'arithmétiques? Les archétypes sont donc géométriques, et ce sera là un présupposé métaphysique que Kepler conservera tout au long de son parcours scientifique.

Pour répondre correctement aux questions cosmographiques, le jeune mathématicien doit trouver une façon d'obtenir exactement six orbites à partir de constructions géométriques. Kepler pousse alors plus loin le raisonnement analogique entre le système (*explanans*) et les phénomènes (*explananda*): les mouvements célestes ayant lieu dans un espace en trois dimensions, ce sont les solides plutôt que les figures planes qui permettront d'élaborer un système du monde. Mais comment, à partir des règles de la géométrie, rendre compte de la disposition de l'univers?

Kepler trouvera son inspiration durant un cours qu'il dispense, alors qu'il trace des quasi-triangles s'emboîtant l'un l'autre dans un cercle; cela lui donnera l'idée d'emboîter ensuite des solides et des sphères. Il ne reste donc plus qu'à trouver une façon de limiter le nombre de solides admissibles afin d'obtenir exactement six orbites. Kepler se fonde alors sur la proposition 18 du livre XIII des *Éléments* d'Euclide, où il est démontré que seuls cinq solides réguliers peuvent être construits ou conçus par l'esprit⁷⁴: le tétraèdre (4 triangles), le cube (6 carrés), l'octaèdre (8 triangles), le dodécaèdre (12 pentagones) et l'icosaèdre (20 triangles). C'est dans ces solides, dits platoniciens (ce sont les mêmes qui sont évoqués dans le *Timée* de Platon, 53c-56c), c'est-à-dire les seuls polyèdres convexes formés de figures équilatères, que l'astronome trouve la pierre de touche de son modèle cosmographique. Kepler met en valeur leur supériorité par rapport aux autres solides géométriques: « La noblesse de ces corps est due à leur simplicité et au fait que leurs faces sont à égale distance du centre de la

⁷² *Idem.*

⁷³ Nous reviendrons sur cet argument dans le chapitre 3, à la section 3.2.

⁷⁴ Cf. *Opera omnia*, I, p. 109; *Le secret du monde*, Ancienne préface, p. 36.

figure. »⁷⁵. Un système où de tels solides servent d'archétypes mathématiques pour la construction du monde comporte le grand avantage de répondre aux deux premières des trois questions posées au début de l'ouvrage : si l'on place chacune des trajectoires planétaires sur des surfaces sphériques tangentes, intérieurement et extérieurement, à un des cinq solides platoniciens, tous centrés sur le Soleil, non seulement l'on obtient un nombre exact de six planètes, mais leur distance par rapport au Soleil se trouve également dictée par le modèle.

Les recherches cosmographiques du *Mysterium cosmographicum* vont donc dans ce sens : déterminer et justifier rationnellement chacun des emboîtements, pour que chacun ait naturellement une place bien précise dans le système. L'ordre du monde trouvé et justifié par Kepler est le suivant : Soleil, octaèdre, Mercure, icosaèdre, Terre, dodécaèdre, Mars, tétraèdre, Jupiter, cube, Saturne.

Kepler argumente longuement en faveur d'un tel enchaînement des solides : par exemple, les solides primaires – au nombre de trois (dodécaèdre, tétraèdre, cube) – sont ceux qui ne doivent leur origine qu'à eux-mêmes et qui engendrent les solides secondaires (octaèdre, icosaèdre), il est donc logique qu'ils en soient séparés par l'orbe terrestre⁷⁶. Il est intéressant de noter que Kepler assigne une certaine épaisseur aux sphères, afin de rendre compte de l'excentricité des orbites, ce qui permet de conjuguer la perfection sphérique avec les données qui, on le savait déjà⁷⁷, ne correspondaient pas à des cercles parfaits.

Il est à noter également que, pour Kepler, « les polyèdres n'ont évidemment pas d'existence physique »⁷⁸; seules leurs proportions permettent de dicter la disposition des orbes. Quant à ceux-ci, ils ne sont pas matériels non plus : « car pour ce qui est de la matière, c'est-à-dire de la constitution des orbes à partir d'une matière adamantine, même Ptolémée n'a jamais eu une pensée aussi grossière! »⁷⁹ Les polyèdres réguliers ne sont que les entités géométriques que Dieu a pris pour modèle lorsqu'il a créé le monde. Selon Kepler, ce modèle permet de répondre aux deux premières des trois principales questions cosmographiques : seuls six orbes

⁷⁵ « Corporum nobilitas est ex simplicitate et ex aequalitate distantiae planorum a centro figurae. » *Opera omnia*, I, p. 126; *Le secret du monde*, II, trad. A. Segonds, p. 70.

⁷⁶ Pour plus de détails concernant les principes qui régissent l'enchaînement des solides réguliers, cf. FIELD (1988), pp. 53-60.

⁷⁷ Copernic utilisait beaucoup d'épicycles dans son système. Cf. KUHN (1973), pp. 196-202.

⁷⁸ SIMON (1979), p. 282.

⁷⁹ « de materia enim, hoc est, de corpulentia adamantina ne Ptolemaeus quidem adeo crasse philosophatur. » *Opera omnia*, I, p. 153; *Le secret du monde*, XIV, trad. A. Segonds, p. 128.

sont possibles, et les proportions (distances) sont dictées par le modèle. Quant à la troisième question cosmographique (celle des vitesses), nous avons vu⁸⁰ qu'elle serait laissée ouverte et qu'elle trouverait une réponse, plus tard, dans l'*Astronomia nova* : ce serait la loi des aires, la seconde des fameuses « lois de Kepler ».

Une fois qu'il a élaboré ce modèle fondé sur les polyèdres réguliers, Kepler croit avoir trouvé la clef du mystère. Il entend tout de même le confronter avec les données, qui à cette époque sont les mêmes que celles de Copernic.

1.5. La méthode *a priori* mise à l'épreuve par les données observationnelles

Tout d'abord, pour utiliser les termes képlériens, la recherche d'une concordance entre le système et les données d'observation se joue du côté de l'astronomie plutôt que de la cosmographie; cette dernière étant, nous l'avons vu, une discipline mixte, moins rigoureuse, qui vise à mettre au jour les vraies causes plutôt qu'une description numériquement exacte d'un phénomène particulier. Kepler reconnaît toutefois l'urgence de justifier son système face aux astronomes : « [...] je n'ai pas cherché à me soustraire à une condamnation, si jamais mes valeurs s'éloignaient quelque peu de celles de Copernic. »⁸¹ Les valeurs de Kepler sont celles prédites par son propre système; quant aux valeurs de Copernic, elles tiennent lieu des données expérimentales de l'époque – Kepler n'ayant pas encore enrichi ses données par son séjour auprès de Tycho Brahe – et elles jouent donc le rôle, au moment de la rédaction du *Mysterium cosmographicum*, des *explananda*.

Avant de passer à cette mise à l'épreuve, Kepler évalue ainsi les arguments cosmographiques qu'il a proposés:

Jusqu'ici tout ce qu'on a dit, ce ne sont que certains signes conformes et “*arguments vraisemblables*” en faveur du théorème dont nous avons entrepris l'étude. Passons maintenant à l'examen des “distances” des orbites de l'astronomie et aux

⁸⁰ À la section 1.1 de cette thèse.

⁸¹ « [...] neque condemnationem deprecatus sum, si meae a Copernicanis aliquantum recederent. » *Opera omnia*, I, p. 164; *Le secret du monde*, XVIII, trad. A. Segonds, p. 147.

démonstrations géométriques : si tout cela ne s'accorde pas, alors sans aucun doute tout le travail antérieur n'aura été qu'un plaisant divertissement.⁸²

Même si Kepler souligne à maintes reprises le caractère probable ou vraisemblable de ses arguments cosmographiques, je crois toutefois qu'il est préférable de nuancer cet apparent pouvoir qu'auraient les données de reléguer au rang de « divertissement » un tel système⁸³. Ainsi, lorsqu'il y aura discordance face aux données empiriques, Kepler aura recours à plusieurs stratégies avant de songer à considérer son modèle comme un simple divertissement.

En bon scientifique, Kepler nous invite à user de prudence lors de la comparaison de son système avec les données de Copernic. Tout d'abord, comme nous l'avons vu précédemment, « il nous faut corriger les valeurs de Copernic et les accommoder à l'entreprise que nous poursuivons présentement »⁸⁴, c'est-à-dire qu'il faut les rectifier en prenant le centre du Soleil comme véritable centre de l'univers, et non pas le centre de l'orbe terrestre, comme l'avait fait Copernic. Plus loin, au chapitre 18, il va jusqu'à remettre en question les résultats de Copernic, à qui il reproche d'avoir effectué une sélection dans les observations « afin d'utiliser les plus commodes pour son calcul »⁸⁵. Cependant, Copernic ayant été conscient de la marge d'erreur inhérente à ses recherches, la faute n'est pas imputable au scientifique (dont Kepler fait abondamment l'éloge) mais plutôt à sa science : « Et Copernic semblerait mériter des reproches à bon droit, s'il n'avait agi ainsi en connaissance de cause, pour la raison que mieux valait avoir une astronomie imparfaite que pas d'astronomie du tout. »⁸⁶ Kepler est conscient que, tout comme Copernic, les données sont loin d'être infaillibles : de légères imprécisions (par exemple, dues aux instruments de l'époque) ont des conséquences immenses lorsqu'elles sont mises à l'échelle astronomique. Enfin, Kepler note à plusieurs reprises à quel

⁸² « Hactenus nihil dictum, nisi consentanea quaedam signa et 'eikota' suscepti theorematis. Transeamus modo ad 'aposêmata' orbium astronomiae et demonstrationes geometricas : quae nisi consentiant, procul dubio omnem praecedentem operam luserimus. » *Opera omnia*, I, p. 148; *Le secret du monde*, XIII, trad. A. Segonds, p. 117 (traduction modifiée).

⁸³ Nous retrouvons ici la même situation que pour le cas des analogies, que Kepler utilise abondamment tout en affirmant à plusieurs reprises qu'il ne s'agit que d'un jeu.

⁸⁴ « retexendi numeri Copernici atque peculiariter accommodandi sunt ad praesens institutum. » *Opera omnia*, I, p. 154; *Le secret du monde*, XV, trad. A. Segonds, p. 129.

⁸⁵ « ut iis eo commodioribus utatur ad axstruendum calculum [...]. » *Opera omnia*, I, p. 166; *Le secret du monde*, XVIII, trad. A. Segonds, p. 151.

⁸⁶ « Atque adeo in reprehensionem incurrere jure videretur : nisi consulto fecisset, eo quod praestaret, imperfectam quodammodo habere astronomiam, quam penitus nullam. » *Opera omnia*, I, p. 166; *Le secret du monde*, XVIII, trad. A. Segonds, p. 151.

point les calculs à effectuer pour vérifier son système sont d'une vaste complexité⁸⁷. Par conséquent, tout désaccord potentiel devra être remis dans cette perspective d'erreurs possibles, et par le fait même, s'en trouvera atténué.

Une fois que sont reconnues les causes d'erreur, Kepler entreprend d'éliminer au maximum leur influence en corrigeant les données. Ce fastidieux travail ne débouche par sur une concordance parfaite; mais Kepler note qu'il y a une certaine approximation possible, laquelle ne peut pas être purement fortuite:

Tu peux conclure de là combien facilement on aurait remarqué, et quelle énorme diversité dans les nombres se serait présentée, si cette tentative avait été faite contre la nature du ciel, autrement dit : si Dieu lui-même dans la Création ne s'était pas référé à ces proportions. Car ce n'est certainement pas par hasard que les proportions des corps sont si voisines de ces intervalles, entre autres raisons parce que l'ordre de ces intervalles est le même que celui que j'ai attribué aux corps en vertu des excellentes raisons présentées plus haut.⁸⁸

Autrement dit, les données coperniciennes, lorsqu'elles sont étudiées du point de vue d'une structure du monde suivant celle des cinq solides platoniciens, nous donnent un indice que nous sommes, à tout le moins, sur la bonne voie. Cette structure, ayant été démontrée *a priori*, ne saurait être abandonnée sous prétexte que les données empiriques, *a posteriori*, imparfaites par ailleurs, ne s'accordent pas parfaitement avec elle : ce serait une grave erreur de voir là « la moindre occasion de rejeter toute cette entreprise à cause d'une très légère contradiction [...] »⁸⁹. Enfin, Kepler croit qu'il ne dispose pas de données suffisamment étoffées pour rejeter légitimement un modèle aussi puissant.

Nous avons vu plus haut⁹⁰ que Kepler aura eu raison, au chapitre 22, de ne pas trop s'en faire avec le désaccord entre les données et son modèle puisque les données obtenues auprès de Tycho Brahe finiraient par confirmer son soupçon selon lequel la Terre aurait bel et

⁸⁷ Kepler souligne fréquemment l'apport de son ancien professeur Michael Mästlin pour la laborieuse tâche calculatrice.

⁸⁸ « Unde colligere potes, quam facile animadversum fuisset, quantaque numerorum exitisset inaequalitas, si haec contra coeli naturam tentarentur, hoc est, si Deus ipse in creatione non ad has proportiones respexisset. Certe enim fortuitum hoc esse non potest, ut tam propincae sint intervallis hisce proportiones corporum, cum propter alia, tum maxime, quia idem ordo est intervallorum, quem supra rationibus optimis corporibus ascripsi. » *Opera omnia*, I, p. 152; *Le secret du monde*, XIV, trad. A. Segonds, p. 128.

⁸⁹ « occasionem ullam praebeam totum hoc negotium propter leviculam discordiam rejiciendi [...]. » *Opera omnia*, I, p. 153; *Le secret du monde*, XV, trad. A. Segonds, p. 129.

⁹⁰ À la section 1.1 de cette thèse.

bien son point équant. Pour le reste, Kepler trouvera plus tard, dans l'*Harmonice mundi*, un autre modèle permettant de rendre compte des proportions, fondé cette fois-ci sur des recherches harmoniques. Comme nous l'avons précisé antérieurement, cela ne veut pas dire que Kepler allait renier complètement son premier modèle. Et peu importe le destin que connaîtrait ce premier modèle fondé sur les cinq corps réguliers de la géométrie, que la science moderne n'a pas retenu, le *Mysterium cosmographicum* contient effectivement les germes de toute la science képlérienne de par ses présupposés métaphysiques et théologiques qui proposent un héliocentrisme fort et une recherche justifiée *a priori* des proportions mathématiques des cieux. Et surtout, en proposant une distinction entre « astronomie » et « cosmographie », Kepler affirmait ses exigences élevées envers la science s'intéressant aux astres. C'était là un pas important pour fonder la nouvelle astronomie dans la physique. Voyons maintenant comment, à peine quelques années plus tard, Kepler raffine sa conception de l'astronomie nouvelle (qu'il ne nomme plus cosmographie) pour en préciser les différentes tâches, les objectifs et la méthode à employer.

Chapitre 2

La nature et le statut des hypothèses astronomiques selon Kepler

Le fait que Kepler expose de façon détaillée toutes les étapes de ses recherches scientifiques – ses intuitions, ses essais, sa démarche, ses réussites, mais aussi ses erreurs et ses déceptions – rend de fiers services à qui veut comprendre son itinéraire rationnel. Nous pouvons par exemple reconstruire sa théorie de la connaissance en étudiant différents passages qui, une fois regroupés, s’organisent de façon cohérente et éloquente. Néanmoins, l’absence de textes proprement philosophiques ou épistémologiques de la part de ce savant est parfois surprenante tant il est évident que l’astronome réfléchissait au sujet de la science qu’il était en train de révolutionner. À cet égard, l’*Apologia pro Tychone contra Ursus* fait figure d’exception. Ayant écrit ce traité à la fin de l’année 1600 à la demande de Tycho Brahe qui se disputait avec Nicolas Raimarus Ursus au sujet de l’originalité de ses découvertes, Kepler, inconfortable d’être impliqué dans une querelle qui ne l’intéressait guère, en profita pour y défendre sa théorie réaliste de l’hypothèse astronomique contre les vues instrumentalistes de Ursus⁹¹. Il s’engagea également dans un compte-rendu critique de l’histoire des théories astronomiques, toujours pour réfuter Ursus, qui prétendait que le système tychonien se retrouvait déjà chez les Anciens. Cependant Kepler abandonna le travail en cours de route et par conséquent, l’œuvre demeura inachevée. Il fallut attendre l’édition des *Opera omnia* de C. Frisch (1858) pour que le manuscrit soit enfin édité, non sans difficultés, causées par les nombreuses ratures, ajouts et annotations propres à un brouillon.

Une fois publié, l’*Apologia* passa plutôt inaperçu parmi les ouvrages képlériens⁹². Il semble même que Kepler n’en était pas satisfait, du moins en ce qui concerne la partie historique⁹³. Malgré le fait que nous ayons sous la main un ouvrage non seulement inachevé, mais écrit davantage par obligation que par réelle intention, les propos de l’*Apologia* me

⁹¹ Pour les circonstances de la composition de l’ouvrage et le débat dans lequel il s’inscrit, cf. JARDINE (1984) pp. 9-28.

⁹² Les études sur Kepler ne tiennent pas toujours compte de l’*Apologia*, ou alors on n’en retient que le point de vue réaliste au sujet de la vérité des hypothèses. La tendance est toutefois en train de se renverser, suite à la traduction anglaise de JARDINE (1984).

⁹³ Cf. JARDINE (1984), p. 28, où l’on renvoie à un extrait d’une lettre de Kepler à David Fabricius.

semblent particulièrement pertinents pour notre étude en ce qu'ils forment le seul traité où Kepler écrit spécifiquement et explicitement au sujet de l'astronomie elle-même et du statut de ses hypothèses⁹⁴. Et même si Kepler y emploie une rhétorique cicéronienne⁹⁵ qui fait elle aussi exception parmi tous ses ouvrages, il n'y a pas lieu de croire que l'astronome n'y ait pas fait preuve de son honnêteté habituelle. Au contraire, les visions de l'*Apologia* trouvent des échos dans d'autres œuvres comme le *Mysterium comographicum*, même si Kepler se garde bien de le citer⁹⁶ afin de ne pas nuire à son objectif assigné qui est d'attaquer Ursus afin de défendre Tycho Brahe, et non pas de défendre explicitement ses propres conceptions scientifiques.

Ce chapitre propose d'examiner les propos de Kepler au sujet de la nature et du statut des hypothèses astronomiques qui se dégagent du premier chapitre de l'*Apologia*⁹⁷. Pour ce faire, les arguments de Kepler seront regroupés selon un ordre différent de celui qu'il emploie pour réfuter, point par point, les opinions de Ursus. Nous commencerons par **(2.1)** mettre au jour la tâche que Kepler assigne à l'astronomie et son caractère polyvalent, avant **(2.2)** d'étudier la méthode qu'il recommande pour remplir cette fonction. Nous pourrions ensuite **(2.3)** aborder l'évaluation des hypothèses astronomiques et le statut de vérité que Kepler leur confère. Nous aurons alors tous les outils pour **(2.4)** comprendre de quelle façon Kepler répond au problème de la concordance des hypothèses et des données observationnelles au sujet duquel sa théorie réaliste prête le flanc. Enfin, nous pourrions **(2.5)** remettre en question l'affirmation selon laquelle l'astronomie moderne, dans le cas de Kepler, serait née d'un affranchissement des *a priori* et d'une mise en valeur de la méthode expérimentale *a posteriori*.

⁹⁴ Marquant ainsi la naissance de l'histoire et de la philosophie des sciences, selon JARDINE (1984) p. 2.

⁹⁵ Son discours comporte les principaux éléments de la tradition rhétorique et dialectique de l'époque: *exordium*, *narratio*, *propositio*, *partitio*, *confirmatio*, *refutatio*. Kepler argumente tout d'abord en exposant son point de vue de façon positive (*confirmatio*), puis en attaquant les positions d'Ursus (*refutatio*). Pour les détails sur cette forme de discours qui tire ses origines de Cicéron, Quintilien et Melanchton, cf. JARDINE (1984), pp. 75-78.

⁹⁶ Sauf à un endroit (*Apologia*, p. 89), où il renvoie le lecteur au premier chapitre du *Mysterium cosmographicum* où il y est expliqué qu'une hypothèse fautive, même si elle peut occasionnellement engendrer des données qui s'accordent effectivement avec les observations, finira toujours par se révéler erronée. Je reviendrai sur ce point à la section 2.3 de cette thèse.

⁹⁷ J'emploierai ici l'édition latine présente dans JARDINE (1984), pp. 85-133, plutôt que celle de C. Frisch dans KEPLER (1858-1870). L'ouvrage de Jardine offre aussi une traduction en anglais qui m'a été également utile, pp. 134-207.

2.1. L'astronomie et ses tâches

À l'instar de Ptolémée, Copernic et Tycho Brahe, Kepler cherche à trouver un ordre au sein de l'ensemble des données observationnelles (positions des planètes, distances angulaires, etc.) qui peuvent sembler tout à fait chaotiques à prime abord. L'intérêt de se rendre à Prague afin de rejoindre et d'assister l'astronome Tycho Brahe, alors *mathematicus* impérial de Rodolphe II, résidait fortement en la possibilité d'avoir ainsi accès à un ensemble précieux de nouvelles données d'observation. Kepler était loin d'être le seul à croire que l'étude des astres comportait un important volet descriptif et prédictif, mais il refusait d'y voir la seule et unique tâche de l'astronomie. Kepler est donc prêt à accorder une certaine valeur instrumentale aux explications avancées par les astronomes, sans pour autant que cela n'épuise la tâche qui leur incombe :

Celui qui prédit de façon très rapprochée le mouvement et la position des étoiles s'acquitte bien de la tâche de l'astronome; mais celui qui, outre cela, emploie des opinions vraies au sujet de la forme du monde remplit mieux [cette tâche] et est considéré comme digne d'un plus grand éloge.⁹⁸

En ce sens, l'astronome « ne doit pas être exclu de la communauté des philosophes, qui enquêtent au sujet de la nature des choses. »⁹⁹ Ce passage montre à quel point Kepler est radical dans son réalisme scientifique : les théories astronomiques doivent rendre compte de la réalité telle qu'elle est, et ne pas simplement s'en tenir à calculer et à prédire les mouvements célestes, comme le conçoivent les instrumentalistes. L'importance de ce réalisme est capitale pour comprendre la fondation de l'astronomie nouvelle¹⁰⁰ : pour Kepler, c'est parce que l'astronomie doit aller au-delà de visées purement instrumentalistes, c'est parce qu'elle doit rendre compte de la véritable nature des choses et non pas seulement « sauver les apparences »¹⁰¹, qu'elle se doit d'être fondée dans la physique.

⁹⁸ « Bene fungitur officio astronomj, qui quam proxime motus et situs stellarum praedicat; melius tamen facit, et majori laude dignus habetur, qui praeter hoc etiam veras de mundi forma sententias adhibet. » *Apologia*, pp. 92-93 (ma traduction).

⁹⁹ « non est [...] astronomus e coetu philosophorum, qui de rerum natura quaerunt [...]. » *Apologia*, p. 92 (ma traduction).

¹⁰⁰ Cette étape cruciale sera approfondie dans le chapitre suivant.

¹⁰¹ Selon les termes de Simplicius, qui fait remonter à Platon cette vision d'une astronomie dont l'unique but est de reconstruire, par des mouvements circulaires et uniformes, les mouvements observés dans les cieux. Cf. DUHEM ([1908] 2003), pp. 13-14.

À titre d'exemples pour illustrer sa définition de la véritable tâche de l'astronome – et ainsi montrer à Ursus qu'une telle aspiration à dépasser le caractère prédictif de cette science n'est pas un simple idéal utopique – Kepler cite Ptolémée, Copernic et Tycho Brahe. Ces trois astronomes, nous dit Kepler, ne se sont pas contentés de trouver des moyens de prédire les mouvements : pour ce faire, Ptolémée n'avait nul besoin de dissenter au sujet de l'ordre des planètes, et pourtant il le fit avec diligence (< *diligenter* >) ; quant à Copernic et Tycho Brahe, ils auraient pu simplement s'en tenir à une correction des dimensions de Ptolémée pour obtenir les mêmes succès prédictifs que dans leurs modèles respectifs.

En ce qui concerne la démarche de Copernic, il est curieux de constater qu'elle jouit d'une bien meilleure réputation dans l'*Apologia* que dans le *Mysterium cosmographicum*¹⁰². En effet, nous avons vu que dans son premier ouvrage, Kepler reprenait l'héliocentrisme de Copernic tout en affirmant leur différence quant à leurs justifications et à leurs motivations scientifiques : alors que Copernic aurait cherché un modèle purement prédictif, Kepler était plutôt en quête d'un modèle qui puisse fournir les causes véritables, *a priori*, de ces données d'observation. Au contraire, dans l'*Apologia*, Kepler mentionne que Copernic a rejeté le modèle ptoléméen « non pas parce qu'il était incompatible avec ce qui est vu et avec l'expérience ou l'observation des étoiles, mais parce qu'il était incompatible avec la Nature des choses. »¹⁰³ Copernic est donc perçu comme un instrumentaliste dans le *Mysterium cosmographicum*, et implicitement critiqué en ce sens, alors qu'il est plutôt glorifié en tant que réaliste dans l'*Apologia*. Nous pourrions sans peine en appeler aux objectifs rhétoriques de l'*Apologia* pour expliquer cette divergence. Ce renversement d'opinion au sujet de Copernic prend toutefois son sens si l'on note qu'il n'était pas clair de pouvoir dire exactement de quel côté cet astronome se situait : d'une part, la méthode exposée dans son *De revolutionibus orbium caelestium*, les propos qu'il tient dans ses lettres et surtout les propos de son élève Rhéticus semblent montrer que Copernic cherchait à aller au-delà de l'impératif de simplement « sauver les apparences »¹⁰⁴, en voulant conjuguer son héliocentrisme avec les principes de la physique ; d'autre part, le *De revolutionibus orbium caelestium* débute avec une

¹⁰² Publié quatre ans auparavant et réédité en 1621. Notons que dans ses commentaires à la seconde édition, Kepler ne rétracte aucunement ses critiques envers Copernic.

¹⁰³ « non quia is motus visui et experientiae seu observationi stellarum, sed quia rerum Naturae repugnaret [...] ». *Apologia*, p. 93 (ma traduction).

¹⁰⁴ Cf. DUHEM ([1908] 2003), pp. 82-88.

préface anonyme (c'est Kepler qui découvrit qu'elle avait en fait été écrite par le théologien Andreas Osiander) affirmant que les hypothèses présentées dans l'ouvrage n'avaient aucune prétention à la vérité : « Il n'est pas nécessaire que ces hypothèses soient vraies ; il n'est même pas nécessaire qu'elles soient vraisemblables ; cela seul suffit, que le calcul auxquelles elles conduisent s'accorde avec les observations. »¹⁰⁵ Nous pouvons sans peine concevoir, comme Kepler, qu'une telle prudence en début du *De revolutionibus* pouvait s'expliquer par la peur du scandale que pouvait engendrer l'exposition d'un tel système, et que Copernic n'endossait pas pour autant ces vues instrumentalistes.

Que Copernic soit dépeint comme un instrumentaliste ou comme un réaliste n'enlève rien au fait que le *Mysterium cosmographicum* et l'*Apologia* coïncident dans leur division entre d'une part la tâche prédictive et d'autre part cette tâche supérieure qui l'accompagne et qui vise à expliquer la vraie nature des choses. Les termes étaient toutefois différents dans son *primum opus*, où ce n'était plus Copernic qui s'opposait à la vision instrumentaliste d'Ursus, mais bien Kepler qui s'opposait à la démarche instrumentaliste de Copernic. Dans cet ouvrage, le terme « astronomie » avait un sens beaucoup plus étroit que dans l'*Apologia* : il s'agissait de cette part de l'astronomie qui s'intéresse au calcul et à la prédiction des mouvements par le biais des outils mathématiques. Kepler la distinguait alors de la cosmographie, discipline générale et mixte qui ne se préoccupe pas tant d'accords avec les données que d'explications véritables pouvant exprimer ce qui est, pour reprendre les mots de l'*Apologia*, la « forme du monde ». Cela dit, bien qu'elles divergent quant aux intentions et aux méthodes employées, astronomie prédictive et cosmographie ne sont pas en opposition puisque ultimement, elles s'accordent quant aux résultats empiriques obtenus. Raisons mathématiques et raisons cosmographiques peuvent donc se compléter, mais malgré l'utilité des premières, ce sont toujours les deuxièmes qui priment et qui peuvent répondre aux vraies questions relatives à la disposition et à la dynamique du monde sidéral.

Au bout du compte, trois éléments¹⁰⁶ font ainsi partie de l'astronomie, nous dit Kepler : les mouvements apparents des étoiles (c'est-à-dire les données observationnelles), les

¹⁰⁵ « Neque enim necesse est, eas hypotheses esse veras, imo ne verisimiles quidem, sed sufficit hoc unum, si calculum observationibus congruentem exhibeant. » Traduction P. Duhem, dans DUHEM ([1908] 2003), p. 89.

¹⁰⁶ « Summa, tria sunt in astronomia, Hypotheses Geometricae, Hypotheses Astronomicae, et ipsi apparentes stellarum motus [...] » *Apologia*, p. 98. Je les présente dans un ordre différent pour le faire correspondre à celui de l'extrait suivant.

hypothèses astronomiques, et les hypothèses géométriques. Chacun de ces éléments peut ensuite être associé à une tâche respective spécifique :

dévoiler dans les livres les trajectoires apparentes des planètes et l'historique de leurs mouvements est l'œuvre de la partie de l'astronomie principalement Mécanique et pratique : découvrir véritablement leurs vraies et authentiques trajectoires est l'œuvre de l'astronomie Contemplative [...] : mais de dire par quels cercles et quelles lignes des images justes de ces mouvements véritables peuvent être dépeintes sur papier appartient au tribunal inférieur de la Géométrie.¹⁰⁷

Une telle dévalorisation de la géométrie par rapport à l'astronomie (pratique ou prédictive) ne doit pas être interprétée comme un rejet des outils mathématiques. Ce serait en effet fort surprenant de la part de ce mathématicien et auteur du *Mysterium cosmographicum* dans lequel il précise bien que le monde a été créé par Dieu selon des archétypes de type géométrique (dans l'*Harmonice mundi*, ces archétypes seront qualifiés d'harmoniques). Mais rechercher les formes abstraites décrivant le monde ne doit pas conduire pour autant à mépriser la matière, « la seule et unique chose après Dieu »¹⁰⁸, c'est-à-dire le substrat de sa création. Et de fait, ce que Kepler critique n'est pas l'utilisation des mathématiques en astronomie mais bien le fait de se limiter à une description géométrique isolée de considérations physiques et métaphysiques qui puissent la justifier.

Maintenant que nous avons vu ce que l'*Apologia* nous enseigne au sujet des trois éléments formant l'astronomie, voyons maintenant comment ils s'articulent au sein d'une méthode qui puisse assurer que les hypothèses astronomiques soient davantage que de simples outils instrumentaux.

¹⁰⁷ « vias planetarum apparentes, et historiam motuum libris promere, astronomiae potissimum Mechanicae et practicae partem esse : vias vero veras et genuinas invenire, opus esse astronomiae Contemplativae [...] : at dicere, quibus circulis et lineis depingantur in papyro imagines justae verorum illorum motuum, ad inferiora Geometrarum subsellia pertinere. » *Apologia*, p. 100 (ma traduction).

¹⁰⁸ « rem unam et solam post deum ». *Apologia*, p. 100 (ma traduction).

2.2. La méthode astronomique

La méthode pour engendrer des hypothèses astronomiques dignes de ce nom trouve ses origines dans cette « forme d'art et surtout de science »¹⁰⁹ qu'est la logique, laquelle s'étend à toutes les sciences :

Puisque la juridiction de la Logique s'étend à travers toutes les sciences, le vocable d'*Hypothèse* fut introduit depuis la logique à l'Astronomie également; ou plutôt il était déjà utilisé en astronomie sans la logique à cause des uniques démonstrations géométriques, et ainsi en son sens authentique.¹¹⁰

La logique ayant elle-même tiré sa méthode de celle qui prévalait en Géométrie, cette dernière est le véritable lieu de naissance de la notion d'hypothèse.

Dès le début du premier chapitre de l'*Apologia*, Kepler procède à un éclaircissement des différentes acceptions du mot *Hypothesis*, en commençant par sa signification originale :

Le premier usage du mot fut auprès des Géomètres, ceux-là qui, avant la naissance de la logique comme partie de la philosophie, alors qu'ils voulaient exposer leurs démonstrations géométriques selon la lumière naturelle de l'esprit, eurent l'habitude de commencer leur enseignement par une sorte de commencement certain.¹¹¹

Il s'agit là du sens le plus fondamental de l'hypothèse, selon Kepler : le point de départ sûr d'une démonstration évidente pour l'esprit. Ensuite, qu'elle prenne la forme d'un axiome (certain et reconnu par tous), d'un postulat (non reconnu par tous, mais démontrable) ou d'une supposition – selon les divers types de démonstrations – ne change rien au caractère établi et démontré de l'hypothèse, afin que le syllogisme puisse aboutir à la vérité¹¹².

Il est fort intéressant de noter que, dans le domaine de l'astronomie, Kepler envisage le processus de démonstration selon deux sens. Tout d'abord, l'astronome peut procéder en

¹⁰⁹ « formam artis adeoque scientiae ». *Apologia*, p. 88 (ma traduction).

¹¹⁰ « Cum itaque Logicae jurisdictio per omnes pateat scientias, ex logica quoque in Astronomiam vox *Hypotheseos* introducta est, quae vel sine logica propter solas demonstrationes in astronomia geometricas, et sic genuino nomine usurpabatur. » *Apologia*, p. 88 (ma traduction).

¹¹¹ « Prima vocis usurpatio fuit apud Geometras : qui ante natam logicam philosophiae partem, naturalj mentis lumine demonstrationes suas geometricas cum vellent expedire, soliti sunt a certo quodam initio doctrinam incipere. » *Apologia*, p. 87 (ma traduction).

¹¹² Kepler nous rappelle que pour qu'une démonstration puisse révéler la vérité, c'est-à-dire générer une conclusion vraie, deux conditions doivent être remplies : 1) les hypothèses doivent être vraies; 2) les liens entre les hypothèses et la conclusion doivent respecter les règles du syllogisme. *Apologia*, p. 89. Cf. ARISTOTE (2005) ; *Seconds Analytiques*, livre I.

prenant comme point de départ l'examen méticuleux des cieux, afin d'en tirer un certain fait au sujet d'une étoile. En effet, les mouvements apparents étant causés par les mouvements actuels des astres, ils apportent les informations requises pour permettre de connaître la réalité astronomique. Dans ce cas-là, ce sont les données d'observation qui sont le point de départ et si l'on suit la définition géométrique, il faut leur accorder le statut d'hypothèses : « Alors l'observation que j'ai mentionnée constitue l'hypothèse dans la démonstration qui a été établie, sur laquelle cette démonstration a été principalement dressée. »¹¹³ Kepler reconnaît tout de même que les données observationnelles ne sont pas ce que nous entendons véritablement par hypothèses astronomiques, mais plutôt ce qui peut en être déduit. Il faut plutôt y inclure « toutes les propositions, physiques et géométriques »¹¹⁴. Celles-ci peuvent venir d'ailleurs – et y avoir été démontrées – ou encore, provenir de démarches syllogistiques préalables effectuées par l'astronome à partir de ses observations, à la manière du sens précédent. Le syllogisme peut donc être utilisé à nouveau pour renverser la situation et transformer les conclusions précédentes en de nouveaux points de départ hypothétiques,

à partir desquels il [*sc.* l'astronome] promet de démontrer, avec la nécessité syllogistique, les positions observées des étoiles (dont il avait fait usage, en premier lieu, comme hypothèses) ainsi que celles qu'il espère voir se manifester de la même façon dans l'avenir.¹¹⁵

Cette démarche d'aller et retour n'est pas circulaire étant donné que le nouveau point de départ devra rendre compte non seulement des observations précédentes dont il a été tiré, mais aussi de celles qui sont à venir.

Nous pouvons lier cette implication bilatérale entre observations et propositions physiques aux démonstrations qui, chez Kepler, s'effectuent tant *a priori* qu'*a posteriori*, respectivement dans la tâche cosmographique (ou physique) et descriptive (ou géométrique). Alors que la méthode *a priori* est vue comme étant supérieure à la méthode *a posteriori* dans le *Mysterium cosmographicum*, elles sont simplement juxtaposées dans le chapitre 33 de son *Astronomia nova* :

¹¹³ « tunc ea quam dixi observatio, in instituta demonstratione fit hypothesis, super quam praecipue demonstratio extruitur. » *Apologia*, p. 88 (ma traduction).

¹¹⁴ « physicae tum Geometricae propositiones, omnes ». *Apologia*, p. 88 (ma traduction).

¹¹⁵ « ex quibus ille [illi] et eos (quibus initio secum hypothesium loco usus erat) observatos stellarum situs, et quos porro similiter apparituros sperat, necessitate syllogistica demonstraturum polliceatur. » *Apologia*, p. 88 (ma traduction).

Assurément, si cela, que j'ai démontré à l'instant *a posteriori* (à partir des observations) par une déduction plutôt longue, si cela, dis-je, je l'avais pris comme devant être démontré *a priori* (à partir de la dignité et de la supériorité du Soleil) [...]; je pense que j'aurais mérité d'être entendu par une oreille aussi favorable.¹¹⁶

Quant à la méthode syllogistique, elle s'opère tant dans le volet cosmographique de l'astronomie que dans son volet géométrique, ce qui spécifie de quelle façon ces tâches peuvent être correctement remplies :

[...] il y a deux tâches distinctes pour un astronome : l'une, relevant véritablement de l'astronomie, est de construire des Hypothèses astronomiques de telle sorte que les mouvements apparents s'ensuivent d'elles; l'autre, relevant de la Géométrie, est de construire des hypothèses Géométriques de n'importe quelle forme (car il peut souvent y en avoir de diverses formes en Géométrie) de telle sorte que les hypothèses astronomiques précédentes, c'est-à-dire les véritables mouvements des planètes, non altérés par la variation de leur aspect, s'ensuivent d'elles et puissent être calculés.¹¹⁷

Dans cet extrait, nous voyons bien comment la méthode géométrique a un rôle subordonné à la « véritable » astronomie en ce qu'elle a pour tâche de trouver des modèles qui aient comme conclusions les hypothèses astronomiques, elles-mêmes générées au sein d'une dynamique qui suppose deux autres processus syllogistiques tel que vu précédemment, ainsi qu'un éventail de présupposés métaphysiques et physiques. Nous avons également un autre indice de la subordination de la géométrie : son caractère multiforme. Autrement dit, sur un plan purement géométrique, il arrive que différentes constructions entraînent exactement les mêmes conséquences observationnelles (mouvements apparents), sans que cela ne nous renseigne davantage sur ce qui se passe réellement (mouvements réels). Une hypothèse géométrique pourrait ainsi être remplacée par une autre sans que cela ne change quoi que ce soit aux conclusions. Pour un astronome comme Kepler qui cherche à comprendre la véritable nature

¹¹⁶ « Sane si hoc ipsum, quod jam a posteriori (ex observationibus) per longiusculam deductionem demonstravi, si hoc, inquam, a priori (ex dignitate et praestantia Soli) demonstrandum suscepissem, [...]; puto me aequis auribus audiri meruisse. » *Opera omnia*, III, p. 301 ; *Astronomia nova*, XXXIII, p. 379 (ma traduction).

¹¹⁷ « [...] duo distincta astronomi officia, alterum vere astronomicum, Hypotheses astronomicas tales constituere, ex quibus apparentes motus sequantur; alterum Geometricum, hypotheses Geometricas cujuscunque formae (variae namque saepe in Geometria esse possunt) tales constituere, ex quibus hypotheses illae priores astronomoicae, hoc est, verj planetarum motus, non adulteratj visus commutatione, et sequantur et calculentur. » *Apologia*, p. 98 (ma traduction).

des choses, une telle description géométrique sans fondements a bien peu de valeur, d'autant plus si elle peut être indifféremment remplacée par une autre¹¹⁸.

Si les hypothèses géométriques ont une valeur instrumentale, pourquoi n'en va-t-il pas de même pour les hypothèses astronomiques? Car même si celles-ci relèvent de la physique ou de la métaphysique, il n'en demeure pas moins qu'elles sont étroitement liées avec les données d'observation dont elles doivent rendre compte. Étant donné la méthode qui a été exposée, on peut envisager qu'il soit possible, pour un même ensemble d'observations, de construire rationnellement différents systèmes physiques pouvant également rendre compte des phénomènes. Rien ne nous assure qu'une seule solution, légitime physiquement ou métaphysiquement, puisse s'accorder avec un ensemble de données. Il est temps de voir de plus près comment Kepler peut prétendre que les hypothèses astronomiques sont vraies et non pas seulement conjecturales en regard de leur accord avec les données.

2.3. L'évaluation des hypothèses astronomiques

Kepler est au fait que selon les règles du syllogisme, du moment que la conclusion est vraie, on ne peut rien conclure de l'hypothèse qui l'implique. Par conséquent, une simple concordance entre les calculs tirés d'une hypothèse et les observations correspondantes ne valide pas cette hypothèse pour autant, puisque – et c'est là l'argument des sceptiques – une fausse prémisse peut parfois générer une conclusion vraie, ne serait-ce que par chance.

Kepler croit toutefois qu'une hypothèse erronée finira toujours par être décelée étant donné qu'elle ne pourra jamais s'accorder parfaitement avec tous les autres syllogismes du système dont elle fait partie, syllogismes qui conduisent eux-mêmes à d'autres prédictions empiriques. Au bout du compte, une hypothèse erronée conduira à des incohérences vu l'interdépendance de toutes les hypothèses du système entre elles :

Et comme dans le proverbe les menteurs doivent se souvenir de ce qu'ils ont raconté, de même ici les hypothèses fausses, qui une fois concluent à la vérité par hasard, ne maintiennent pas ce caractère de conclure à la vérité lorsqu'elles ont été, au cours d'une démonstration, combinées avec plusieurs autres ; mais elles se trahissent elles-

¹¹⁸ À ce sujet, il convient de se rappeler que dans le *Mysterium cosmographicum*, l'utilisation des cinq polyèdres réguliers pour expliquer la disposition des planètes était guidée par des motivations métaphysiques et supportée par de nombreux arguments concernant leur dignité et leur supériorité face aux autres solides.

mêmes. De la sorte, il arrive à la fin que, à cause de l'entrelacement des syllogismes dans les démonstrations, d'une seule erreur suivent une infinité d'erreurs.¹¹⁹

Kepler concède à Ursus qu'il est possible qu'une hypothèse astronomique erronée engendre une conclusion vraie, notamment lorsqu'elle rencontre une autre proposition (vraie ou fausse) qui se lie à elle de façon appropriée pour engendrer une conclusion vraie¹²⁰. Néanmoins, une telle situation due au simple hasard est éphémère¹²¹ et sera rapidement mise au jour étant donné qu'une hypothèse astronomique n'est jamais isolée. On se rappelle que dans la définition des hypothèses astronomiques, il fallait inclure toutes les autres propositions issues de syllogismes effectués tant au niveau de la physique que de la géométrie. Celles-ci peuvent maintenant se regrouper au sein d'un système harmonieux dont l'unité puisse garantir qu'une erreur générera éventuellement beaucoup de contradictions.

Kepler nous dit qu'il a déjà exposé cet argument dans le premier chapitre de son *Mysterium cosmographicum*. En effet, nous y retrouvons un passage qui parle du fait qu'une hypothèse fausse finit toujours par se trahir elle-même :

À ce propos, je n'ai jamais pu être d'accord avec les gens qui s'appuient sur l'exemple d'une démonstration accidentelle qui, à partir de prémisses fausses, par la nécessité syllogistique, produit quelque chose de vrai. [...] En effet, la consécution à partir de prémisses fausses est fortuite, et ce qui est faux par nature se trahit sitôt qu'on le rapproche d'une autre chose apparentée ; à moins que l'on ne concède sans discussion à son contradicteur d'assumer une infinité d'autres propositions fausses, jamais, ni dans la déduction ni dans la remontée, il ne pourra être d'accord avec lui-même.¹²²

¹¹⁹ « Atque, ut in proverbio et monentur mendaces, ut sint memores : ita hic falsae hypotheses, verum semel fortuito concludentes, in progressu demonstrationis, ubi alijs atque alijs fuerint accommodatae, morem hunc verum concludendj non retinent, sed seipsas produunt. Ita tandem fit, propter syllogismorum in demonstrationibus implexum, ut uno inconvenientj dato, sequantur infinita. » *Apologia*, p. 89 (ma traduction).

¹²⁰ Kepler cite l'exemple de Copernic qui avait confirmé sa thèse (erronée) du parallaxe lunaire en observant l'occultation de l'étoile au cœur de la constellation du Scorpion. Il se trouve qu'il avait accumulé en chemin deux erreurs (mauvaise latitudes de la Lune et de l'étoile) qui, mises ensemble, menaient également à l'occultation de l'étoile au moment prèdit.

¹²¹ « fortuito fit, nec semper ». *Apologia*, p. 89 (ma traduction).

¹²² « Atque hoc loco nunquam assentiri potui illis, qui freti exemplo accidentariae demonstrationis, quae ex falsis praemissis necessitate syllogistica verum aliquid infert [...]. Nam ista sequela ex falsis praemissis fortuita est, et quae falsi natura est, primum atque alii rei cognatae accommodatur, se ipsam prodit : nisi sponte concedas argumentatori illi, ut infinitas alias falsas propositiones assumat, nec unquam in progressu regressuque sibi ipsi constet. » *Opera omnia*, I, p. 112; *Le secret du monde*, I, trad. A. Segonds, p. 44.

Kepler spécifie ensuite qu'une hypothèse vraie, contrairement à la fausse, ne sera jamais en contradiction avec aucun phénomène observé : la « trahison » dont il parle cette fois-ci concerne précisément les observations plutôt que les autres syllogismes. Comme le remarque la philosophe Rhonda Martens :

In the *Mysterium* Kepler argued that a false hypothesis will betray itself when applied to diverse data. [...] In the *Apologia*, he made the more general claim that a false hypothesis will betray itself when linked with other hypotheses during demonstrations.¹²³

Il s'agit là sans doute de deux critères importants pour l'astronome dans son évaluation de la valeur de vérité d'une hypothèse : 1) elle doit s'accorder avec les autres hypothèses du système ; 2) aucun phénomène, présent ou à venir, ne doit entrer en contradiction avec elle.

En ce qui concerne le premier critère, nous pourrions y voir également une recommandation à saveur heuristique : construire des méthodes de calcul géométrique en partant de considérations physiques permettrait d'augmenter les chances de réussite lors de la confrontation avec les données. N'oublions pas que trouver de telles constructions géométriques qui sont adéquates avec les observations est loin d'être une tâche aisée, surtout à cette époque où l'on ne disposait pas d'une technologie permettant de faciliter le calcul. Selon Kepler, cette tâche « remplie de labeur et de troubles élevés »¹²⁴ se trouve d'avance vouée à l'échec si elle ne s'accorde pas avec les mouvements mêmes des planètes tels qu'ils peuvent être décrits éventuellement par des hypothèses physiques :

Ainsi, si nous ne nous occupons pas de ce qu'un certain calcul réponde aux mouvements : absolument rien ne nous empêche d'autant moins de façonner de très nombreuses hypothèses – ce qui, comme le disait et redisait Ursus, était facile pour lui – et de construire tout autant de formes de calcul qui soient, n'est-ce pas, vicieuses et en désaccord avec les cieux.¹²⁵

¹²³ MARTENS (2000), p. 63.

¹²⁴ « plena laboris [...] et curae summae ». *Apologia*, p. 94.

¹²⁵ « Ita si nobis nil curae est, utrum aliquis calculus motibus respondeat : nihil sane impedit, quo minus plurimas fingamus hypotheses, quod sibi facile dictitabat Ursus, totidemque calculorum formas constituamus, vitiosas nempe et a caelo dissonas. » *Apologia*, p. 95 (ma traduction).

D'où l'avantage de s'intéresser d'abord à la dynamique avant de passer à l'aspect géométrique afin de maximiser les chances de réussite¹²⁶.

Le fait que l'on puisse éventuellement détecter une hypothèse fautive est fort utile pour garantir qu'en astronomie, les propositions qui ont survécu jusqu'à présent soient vraies. Rien de faux ou de conjectural n'est proposé en astronomie, « car chacun reconnaît haut et fort une hypothèse telle qu'il ne reconnaît rien d'autre qui ne soit reconnu et établi. »¹²⁷ Néanmoins, comment garantir que ces hypothèses ne seront pas réfutées dans le futur? Ne faut-il pas plutôt admettre que, tout comme les grands astronomes du passé qui ont formulé des systèmes qui furent « falsifiés » par la suite, l'astronome d'aujourd'hui risque de se retrouver dans la même situation?

Kepler est prêt à reconnaître que l'astronomie aura toujours une part d'imperfection : « Nul ne peut nier qu'il y ait encore des taches même dans l'astronomie la mieux construite, et par le fait même dans les Hypothèses aussi. »¹²⁸ Mais il ne faut pas en conclure pour autant que tout est incertain, comme le prétendent les sceptiques. Car même dans les systèmes des astronomes du passé, il y avait une part importante de vrai, tandis que les erreurs ont pu être corrigées par leurs successeurs. Ainsi, bien que le géocentrisme de Ptolémée ait été rectifié par Regiomontanus et Copernic en vertu d'un désaccord avec la magnitude apparente de la Lune, il n'en demeure pas moins que bien des propositions ptoléméennes sont « certainement vraies et en accord avec la forme du monde »¹²⁹. De même, il existe des points communs entre le système de Copernic et celui de Tycho Brahe, propositions dont on n'a aucune raison de douter¹³⁰. Enfin, affirmer comme Ursus qu'il y a des absurdités dans toutes les hypothèses émises jusqu'à présent par les astronomes est complètement faux, du moins si on se réfère aux connaissances des hommes de génie, lesquelles diffèrent des opinions des hommes¹³¹.

La pratique de l'astronomie consiste donc, en plus de devoir créer de nouvelles propositions pouvant engendrer les mouvements (apparents et réels) via la méthode

¹²⁶ Nous avons là une première piste pour comprendre pourquoi, dans l'*Astronomia nova*, la description elliptique de la trajectoire des planètes est énoncée bien après la loi des aires, ce qui peut sembler contre-intuitif.

¹²⁷ « Quam enim quisque profitetur hypothesin, non aliter nisi ut notam et exploratam profitetur. » *Apologia*, p. 95 (ma traduction).

¹²⁸ « Esse quosdam adhuc naevos, etiam in optime constituta astronomia, proptereaque et in Hypothesibus, nemo negat. » *Apologia*, p. 94 (ma traduction).

¹²⁹ « certe vera sunt et formae mundanae consona ». *Apologia*, p. 95 (ma traduction).

¹³⁰ Par exemple, que le Soleil est le centre du mouvement des planètes. Cf. *Apologia*, p. 95.

¹³¹ « Varias sunt hominum sententias, varij captus ingeniorum. » *Apologia*, p. 93.

sylogistique, à comparer les hypothèses de ses prédécesseurs et à corriger les erreurs qui peuvent s'y être glissées. Par conséquent, la succession des différents modèles astronomiques peut se comprendre comme un processus cumulatif et évolutif au cours duquel certaines erreurs sont corrigées au fur et à mesure par les scientifiques¹³², au lieu d'un éventail de systèmes tout aussi arbitraires les uns que les autres.

Maintenant que nous avons en main les principales positions de Kepler au sujet de la nature d'une hypothèse astronomique, nous pouvons voir plus précisément de quelle façon il peut accepter comme vraies les explications astronomiques sans tomber pour autant dans le piège de l'incohérence logique.

2.4. Le problème de la concordance des hypothèses et des données observationnelles

Le problème est le suivant : si l'on pense comme Kepler que la méthode astronomique engendre, à partir des observations, des hypothèses astronomiques vraies qui correspondent réellement à la nature des choses, comment expliquer alors qu'il y ait une telle diversité de systèmes concurrents (Ptolémée, Tycho Brahe, Copernic) qui s'accordent avec les mêmes observations? L'objectif de Kepler est ici de réfuter l'argument d'Ursus selon lequel le même résultat empirique peut être dérivé de différentes hypothèses astronomiques équivalentes, ce qui entraîne la conséquence sceptique selon laquelle il est impossible d'affirmer en même temps la vérité de celles-ci sans tomber dans une insoutenable contradiction.

Une première réponse de Kepler à cette objection consiste à dire que ces différents systèmes ne sont jamais parfaitement équivalents du point de vue des résultats empiriques. Kepler rejette la démonstration de Giovanni Magnini selon laquelle les systèmes de Ptolémée et de Copernic prouvaient exactement les mêmes mouvements apparents¹³³ en faisant valoir que le modèle copernicien avait une plus grande portée explicative, par exemple en rendant compte du fait que Mars a un plus grand parallaxe que le Soleil, ce qui n'était pas prédit par le modèle ptoléméen. Mais même si deux systèmes prédisaient exactement les mêmes résultats – par exemple, celui de Tycho Brahe et celui de Copernic – ils différeraient sur le plan de

¹³² Pour d'autres propos sur cette méthode de corrections successives, cf. *Apologia*, p. 96.

¹³³ Cf. *Apologia*, p.90. L'œuvre de Magnini est le *Novae coelestium orbium theoricæ congruentes cum observationibus N. Copernici* (Venise, 1589). Cf. JARDINE (1984), p. 141.

l'intention¹³⁴, Tycho Brahe ayant voulu éviter de postuler l'immensité des étoiles fixes. C'est donc dire que si deux systèmes d'hypothèses semblent parfaitement équivalents en regard des mouvements apparents qu'ils décrivent, il suffit de se mettre au point de vue de la physique pour découvrir qu'ils entraînent chacun leurs propres corollaires physiques : « Et même si les conclusions de deux hypothèses coïncident à l'intérieur de la Géométrie, chacune [d'elles] aura son propre ajout à l'intérieur de la physique ».¹³⁵ Cette réponse rejoint l'essentiel de ce que nous avons vu précédemment au sujet de l'objectif de la véritable astronomie, qui va au-delà des descriptions géométriques.

Néanmoins, Kepler apporte une autre réponse à ce problème qui n'est pas dénuée d'intérêt. C'est qu'à un certain moment de son discours, Kepler se glisse dans la peau de son adversaire afin d'apporter des arguments sous la forme de la *concessio*¹³⁶, stratégie rhétorique qui consiste à montrer que l'argument de son interlocuteur est fallacieux quand bien même on lui accorderait la vérité de ses prémisses. Dans ce cas-ci, il s'agit pour Kepler d'admettre le point de vue d'Ursus selon lequel la seule fonction des hypothèses astronomiques est de sauver les phénomènes. Alors dans ce cas, si l'on se penche sur les systèmes de Ptolémée et de Copernic, et en admettant que la proposition de Magnini soit recevable, n'obtient-on pas des systèmes astronomiques équipotents? Le cas échéant, est-ce à dire qu'ils sont tous vrais en même temps et sous le même rapport, ce qui entraînerait une insoutenable contradiction?

Kepler reconnaît que dans ce cas, il est impossible d'affirmer la vérité des deux systèmes :

Certainement, si des [propositions] contradictoires ne peuvent être vraies en même temps, ces deux-là ne seront pas vraies en même temps; mais l'une des deux sera tout à fait fausse.¹³⁷

Mais un tel cas serait tout aussi inconcevable pour Kepler, car cela voudrait dire que le vrai (c'est-à-dire les mouvements apparents) pourrait logiquement s'ensuivre autant du vrai que du faux¹³⁸. La solution de l'*Apologia* sera de nier, cette fois-ci, que ces deux systèmes soient

¹³⁴ « in hoc tamen differet intentum demonstrationum Tychonis a Copernicanis. » *Apologia*, p. 90.

¹³⁵ « Nam si in Geometricis duarum hypothesium conclusiones coincidant, in physicis tamen quaelibet habebit suam peculiarem appendicem. » *Apologia*, p. 90 (ma traduction).

¹³⁶ Cf. JARDINE (1984) pp. 77-78, qui nous renvoie à Quintilien, *Institutio oratoria*, IX, 2, 51.

¹³⁷ « Sane si contradictoria simul vera nequeunt esse, neque haec duo simul vera erunt; sed alterum omnino falsum. » *Apologia*, p. 91 (ma traduction).

¹³⁸ « Ex falso itaque aequae ac ex vero verum nonne sic sequitur? » *Apologia*, p. 91.

différents : s'ils entraînent les mêmes conséquences empiriques, c'est qu'ils sont tous les deux des espèces d'une seule et même hypothèse, ce qui fait disparaître le risque d'incohérence logique. Pour permettre une telle chose, l'auteur fait appel à des concepts inspirés des *Seconds analytiques* d'Aristote, ceux de « genre » et de « moyen terme »¹³⁹. Dans le cas qui nous intéresse, les deux systèmes concurrents sont en fait deux moyens termes qui, lorsqu'ils sont envisagés selon le but (descriptif) de la démonstration, tombent sous un genre commun.

Afin d'illustrer cette position, Kepler offre un exemple que nous pouvons reconstruire de la façon suivante. Soit H_1 la proposition copernicienne selon laquelle la Terre se meut; H_2 la proposition ptoléméenne selon laquelle les cieux se meuvent autour de la Terre; et P , l'ensemble des phénomènes célestes (tels que l'émergence du zodiaque, la succession des jours et des nuits, ainsi que les mouvements apparents des étoiles). Puisque nous supposons que les deux systèmes s'accordent avec les phénomènes, nous avons :

$$(1.) H_1 \Rightarrow P ;$$

$$(2.) H_2 \Rightarrow P ;$$

En vertu de la position accordée à Ursus dans le cadre de cet argument *ex concessione*, la description des phénomènes est suffisante pour affirmer la vérité des hypothèses :

$$(3.) P ;$$

$$(4.) \text{Donc } H_1 \text{ et } H_2.$$

Pour empêcher l'incohérence logique, il faut éviter que H_1 et H_2 soient contradictoires. Une façon d'y arriver est de les regrouper sous une instance générale $H = \{H_1, H_2, H_3, \dots, H_n\}$. Pour trouver ce qu'est H , il suffit de chercher une façon d'exprimer ce qu'il y a de commun entre H_1 et H_2 . Dans le cas de notre exemple, H traduit la proposition selon laquelle il y a une séparation entre les mouvements des cieux et ceux de la Terre, suivant une ligne courbe reliée au trajet du Soleil. Les explications particulières H_1, H_2 peuvent se comprendre comme deux façons différentes d'affirmer le même mouvement H causant les phénomènes P . En regard de la démonstration, seul « $H \Rightarrow P$ » nous intéresse :

¹³⁹ Tout en leur apportant une signification différente. Cf. JARDINE (1984) p. 210, et bien sûr les *Seconds analytiques* d'Aristote.

Donc les choses mentionnées [*sc.* les phénomènes P] sont démontrées par deux hypothèses, dans la mesure où elles tombent sous un seul genre, et non dans la mesure où elles diffèrent entre elles.¹⁴⁰

C'est donc dire que même s'il y a contradiction physique entre les propositions particulières H_1 et H_2 , cela ne concerne pas la démonstration qui est en cours¹⁴¹. Ce qui arrive effectivement lorsque nous nous plaçons du point de vue instrumentaliste d'Ursus.

Kepler nous donne un autre exemple qui est intéressant dans la mesure où il sera au cœur des recherches de l'*Astronomia nova*. Soit H_1 l'hypothèse selon laquelle les planètes se déplacent en suivant un cercle excentrique; H_2 , l'hypothèse selon laquelle elles se déplacent en suivant plutôt un cercle concentrique avec épicycle; et P , l'observation selon laquelle la planète se déplace selon un mouvement circulaire régulier mais en passant plus de temps dans une des moitiés du cercle. Selon le même raisonnement que l'exemple précédent, on doit affirmer la vérité à la fois de H_1 et de H_2 , ce qui peut se faire si elles sont toutes deux des instances particulières de la proposition commune H selon laquelle l'orbite des planètes a telle forme déterminée. Donc, même si H_1 et H_2 sont deux façons différentes de construire géométriquement l'orbite des planètes, celle-là demeure la même dans les deux cas. H_1 et H_2 sont ainsi la même hypothèse H qui consiste en l'orbite elle-même. Du point de vue de l'astronomie, il n'y a donc plus de contradiction puisqu'au final, les deux hypothèses renvoient à la même réalité à partir de laquelle s'ensuivent les mouvements apparents.

Si le deuxième exemple peut s'interpréter comme une façon d'exprimer la supériorité des hypothèses astronomiques sur les constructions géométriques, le premier nous semble plus éloigné des intuitions de Kepler. Ce dernier refuse certainement de jauger les hypothèses en ignorant les différences physiques et en se contentant du point de vue géométrique. Cette divergence s'explique facilement si on rappelle le caractère *ex concessione* de l'argument. Nous pouvons également y voir une valeur heuristique : chercher ce qu'il y a de commun entre différentes hypothèses concurrentes pourrait nous aider à formuler la bonne hypothèse qui puisse vraiment exprimer la nature des choses.

¹⁴⁰ « Demonstrantur igitur antedicta per duas hypotheses, quatenus illae sunt sub uno genere, non quatenus inter se differunt. » *Apologia*, p. 91 (ma traduction).

¹⁴¹ « Ac etsi illis adhaereat contradictio physica, illa tamen demonstrationem jam nihil attinet. » *Apologia*, p. 91.

2.5. L'importance du réalisme et des fondements *a priori*

Les propos de l'*Apologia* nous ont montré, de façon fort explicite, que Kepler envisage les hypothèses astronomiques de façon réaliste, et que par conséquent, il souhaite construire une astronomie en accord avec les principes de la physique – et pour Kepler, cette physique se devra aussi d'être en accord avec la métaphysique, en vertu de la théorie des archétypes, laquelle garantira aussi que le monde puisse se comprendre de façon mathématique. C'est là un premier pas, innovateur et fondamental, vers la construction de l'astronomie nouvelle. Le prochain chapitre se penchera plus spécifiquement sur ce pas révolutionnaire, en montrant comment Kepler critique et s'inspire à la fois des Anciens pour élaborer sa nouvelle astronomie. Nous aurons l'occasion de voir ensuite, à partir du quatrième chapitre de cette thèse, si et comment Kepler applique cette méthode lorsqu'il effectue lui-même les tâches inhérentes à l'astronomie.

Pour un réaliste comme Kepler, l'astronomie bien menée permet de donner naissance à des théories qui sont justes, en adéquation avec le monde, et non simplement de formuler des moyens calculatoires provisoires. À la lumière de cette considération, il peut sembler toutefois curieux de constater qu'à plusieurs reprises dans l'*Astronomia nova* ou même dans le *Mysterium cosmographicum*, Kepler est au fait du statut « probable » ou « plausible » des hypothèses qu'il formule. Voyons par exemple cette citation, où Kepler traite de son modèle fondé sur les cinq solides platoniciens, en s'interrogeant sur leur disposition : « Aussi est-il **vraisemblable** que Mars entoure la terre avec, dans l'intervalle, l'un ou l'autre de ces corps. »¹⁴² Kepler fait souvent preuve d'une telle retenue lors de ses spéculations effectuées à partir des considérations physiques. Nous avons vu également, au chapitre précédent, la retenue qu'il affichait lorsqu'il se mettait à employer des analogies. La question se pose : comment interpréter ce statut « probable » à la lumière du réalisme proclamé dans le texte que nous venons d'analyser ? Car si l'astronomie permet de percer le mystère véritable du monde, du moment qu'elle mène à une hypothèse concordante avec les phénomènes et en accord avec la physique, autrement dit, du moment qu'elle est vérifiée *a posteriori* et fondée *a priori*, elle correspond à la nature véritable des choses ; elle est donc vraie et pas seulement vraisemblable

¹⁴² « Quare **verissimile** est, Martem ambire Terram mediante alterutro hororum corporum. » *Opera omnia*, I, p. 125 ; *Le secret du monde*, II, trad. A. Segonds, p. 70. Je souligne.

ni probable. Nous pourrions soupçonner que la défense réaliste de l'*Apologia* a peut-être été accentuée en fonction des objectifs rhétoriques initiaux (combattre l'instrumentalisme d'Ursus), à moins que Kepler ne fasse preuve d'une modeste retenue lorsqu'il nous communique ses trouvailles dans ses œuvres scientifiques. Une troisième possibilité serait que l'*Apologia* décrive, pour Kepler, les conditions pour obtenir une astronomie idéale, alors que dans la pratique il en aille parfois autrement. C'est cette dernière explication que je privilégie et qui se dégagera de mon interprétation de la méthode képlérienne. Nous verrons notamment que s'il est possible pour cet astronome d'être réaliste, soit de croire que l'astronomie reflète la véritable nature des choses, tout en affirmant le caractère provisoirement vrai d'une hypothèse astronomique, c'est qu'il en va ainsi de la logique abductive¹⁴³.

Cela nous permet déjà de remettre en question un préjugé encore bien tenace, selon lequel l'astronomie nouvelle et la science moderne seraient nées de l'affranchissement des *a priori* ou de tout présupposé théologique ou métaphysique afin de laisser libre cours à une méthode purement expérimentale, fondée sur l'expérience et les faits observés, davantage exigeante quant à l'exactitude empirique. Cette vision caricaturale de la révolution copernicienne est encore trop présente dans la littérature populaire, et parfois savante. Dans le cas de la naissance de ce qui allait devenir l'astrophysique, c'est justement le désir de dépasser simplement la description des phénomènes qui allait permettre d'envisager cette nouvelle science du ciel fondée sur les principes physiques ; ce sont les croyances théologiques qui allaient permettre, de façon heuristique certes, mais aussi justificatrice, de poser les assises d'un système héliocentrique qui semblait complètement absurde et qui n'était, contrairement à la croyance populaire, ni plus simple, ni plus efficace pour rendre compte des phénomènes ; enfin, c'est le développement d'une métaphysique fondée sur les archétypes qui allait permettre d'assurer que l'on puisse décrire ces phénomènes de façon mathématique.

En résumé, notre lecture de l'*Apologia pro Tychone contra Ursum* nous apporte plusieurs éléments annonçant la construction képlérienne d'une astronomie réaliste qui puisse inclure des considérations tant mathématiques que physiques, ce qui est un pas majeur en direction de l'astronomie nouvelle qu'il était sur le point de fonder. Afin de bien jauger le caractère novateur de cette approche, il est impératif de bien comprendre en quoi cette

¹⁴³ C'est là l'objet de la seconde partie de cette thèse.

conception de l'astronomie différait de la physique aristotélicienne qui prévalait à l'époque. Or en lisant bien Aristote et Kepler, nous pouvons constater à quel point, en fait, le second s'est également fortement inspiré du premier quant à sa conception de la science, tout en allant puiser dans d'autres traditions philosophiques et scientifiques. C'est ce que nous verrons dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Les sources ayant influencé Kepler dans son élaboration d'une nouvelle astronomie ou physique céleste *aitiológêtos*

Une grande partie de la littérature savante consacrée à la révolution astronomique des XVI^{ème} et XVII^{ème} siècles met l'accent sur les aspects novateurs de l'héliocentrisme par rapport à la conception aristotélicienne du monde (géocentrique) qui prévalait à l'époque, sous une forme remaniée par la tradition et les différentes interprétations médiévales. Il est certes inévitable de noter à quel point Copernic, Tycho Brahe et Kepler étaient à contre-courant de leur époque et à quel point ils ont dû faire preuve de génie et de créativité pour concevoir un modèle de l'univers qui nous semble maintenant si évident. Kepler lui-même critique abondamment les positions aristotéliciennes de façon explicite, afin que l'on puisse accepter son propre système. Quant au contenu scientifique, il y a effectivement un changement révolutionnaire ; mais la question est moins tranchée lorsqu'on envisage leurs différentes positions respectives quant aux motivations de la science astronomique. En effet, nous pouvons remarquer que Kepler critique Aristote tout en s'en inspirant et en le remaniant afin d'offrir une astronomie satisfaisant les exigences de la démonstration scientifique. Autrement dit, nous pourrions dire que Kepler est beaucoup plus aristotélicien que ce que la tradition en a retenu.

Il est donc pertinent, avant d'entamer notre lecture attentive de l'*Astronomia nova*, de bien comprendre les sources ayant pu influencer Kepler, soit de façon positive, en l'inspirant, ou de façon négative, par le biais d'une critique ; nous verrons notamment que Kepler procède habituellement à une reprise critique de chacune de ces sources dans l'élaboration et la conception de sa nouvelle astronomie. Nous commencerons par l'apport et la critique d'Aristote (3.1), cette source étant probablement la plus importante quant à la physique de l'époque ; mais nous ne saurions passer sous silence l'important apport de Platon, des Pythagoriciens et des Néo-platoniciens (3.2), plus reconnu celui-là, dont nous avons déjà vu quelques traces dans la théorie des archétypes mathématiques. Nous nous tournerons ensuite vers les sources proprement mathématiques (3.3), notamment chez Archimède et Euclide,

avant de faire un bref tour du côté de la théorie magnétique de Gilbert (3.4), particulièrement présente dans l'*Astronomia nova*. Cela complétera notre tour d'horizon des sources, essentiel avant de nous pencher en détail sur les arguments scientifiques de Kepler.

3.1. L'apport et la critique d'Aristote

Afin de pouvoir convaincre ses lecteurs de la validité de son nouveau système, Kepler a consacré une grande partie de son projet à combattre les positions aristotéliennes qui prévalaient à l'époque sous une forme remaniée¹⁴⁴. Je ne proposerai pas ici une nouvelle analyse historique de cette conception, ni ne noterai tous les points où Kepler est en désaccord avec le Stagirite. Pour le bien de cette étude, je puiserai à même les éléments qui ont été extraits jusqu'à présent du corpus képlérien, dans les deux chapitres précédents, en pointant ceux qui se distinguent radicalement de la tradition aristotélienne ou, au contraire, ceux qui s'en inspirent directement.

Notons d'entrée de jeu que Kepler, bien qu'il critique souvent Aristote de façon explicite, ne craint pas d'accorder beaucoup de crédit à son argumentation et à plusieurs de ses positions. Il n'est pas impossible que l'astronome ait agi ainsi d'abord pour mieux convaincre ses contemporains. Par exemple, nous pouvons remarquer que les positions képlériennes restent parfois assez proches de celles d'Aristote, quant aux arguments avancés. Il en va ainsi de l'argumentation en faveur de la sphéricité du monde :

Que le monde entier, donc, soit enfermé par une figure sphérique, **c'est ce dont Aristote a assez longuement disputé**, tirant ses arguments, entre autres choses, de la noblesse de la surface de la sphère ; et **c'est pour les mêmes raisons** que, chez Copernic aussi, la toute dernière sphère, celle des fixes, bien qu'elle soit privée de mouvement, conserve la même figure et reçoit en son sein le Soleil comme en son centre.¹⁴⁵

¹⁴⁴ Beaucoup d'ouvrages ont été consacrés à l'exposition et à l'analyse de ces positions aristotéliennes. Voir par exemple METHUEN (1998), VOELKEL (2001), SCHMITT (1975). Un très bon exposé de l'univers aristotélien et de son remaniement par la tradition jusqu'à Copernic se retrouve dans KUHN (1973), pp. 89-154. Un résumé clair et concis de l'héritage astronomique depuis Aristote jusqu'à Kepler peut être lu dans MARTENS (2000), pp. 18-32.

¹⁴⁵ « Mundum igitur totum figura claudi sphaerica, **abunde satis disputavit Aristoteles** (libro II de coelo), ductis inter cetera ex nobilitate sphaericae superficiae argumentis : **quibus etiamnum** ultima Copernici fixarum sphaera

Les arguments dont il est question dans cet extrait sont ceux avancés dans le deuxième chapitre du traité *Du ciel* où Aristote, en plus d'apporter des preuves tirées de l'observation, conclut à la sphéricité du monde étant donné la primauté de la sphère : « Le ciel a nécessairement une forme sphérique, car cette figure est la mieux adaptée à sa substance et elle est première par nature. »¹⁴⁶ Nous avons vu que pour Kepler aussi, la noblesse de la sphère rend celle-ci digne d'être le miroir de la trinité divine. Évidemment, et nous y reviendrons, cette sphère n'aura pas le même centre chez Aristote d'une part, et chez les partisans de l'héliocentrisme d'autre part.

L'une des affirmations képlériennes s'éloignant d'Aristote est sans contredit l'affirmation de la création du monde, fournie dès la dédicace du *Mysterium cosmographicum* :

Je passe sous silence le fait que mon sujet **est un puissant argument en faveur de la Création**, que les Philosophes ont niée, quand nous voyons comment Dieu, à l'instar de n'importe quel architecte humain, a procédé à la création du monde **avec ordre et mesure** et qu'il a ainsi mesuré chaque chose, comme si ce n'était pas l'art qui imitait la Nature, mais Dieu lui-même qui avait considéré la manière de construire de l'homme qui devait exister un jour !¹⁴⁷

Chez Aristote, l'éternité du monde est défendue dans son traité *Du ciel* (I, 10 - II, 1), où il s'oppose notamment à Platon, dont le *Timée* offre le récit d'un monde engendré, quoique éternel. Cette position est cruciale pour le développement des principes de la physique du ciel chez Aristote, puisque de l'éternité du monde, s'ensuivent son incorruptibilité et son caractère inengendré. Deux idées principales méritent d'être discutées dans cette citation ; elles correspondent respectivement aux deux passages que j'ai soulignés.

En premier lieu, nous pouvons remarquer que la prétérition présentée au début du passage ressemble à ce que l'on pourrait appeler une preuve physico-théologique de l'existence de Dieu, qui va comme suit : puisque le monde nous semble ordonné, nous

quamvis motu carens eandem figuram tuetur, recipitque Solem tanquam centrum in intimum sinum. » *Opera omnia*, I, p. 123 ; *Le secret du monde*, II, trad. A. Segonds, p. 65. Je souligne.

¹⁴⁶ *Du ciel*, B, 3, 286b10-11 ; ARISTOTE (2003), trad. P. Moraux, p. 63.

¹⁴⁷ « Taceo, quod haec materia **creationis**, quam negarunt philosophi, **magnum argumentum est** : dum cernimus, uti Deus instar alicujus ex nostratibus architectis, **ordine et norma** ad mundi molitionem accesserit, singulaque sit ita dimensus, quasi non ars naturam imitaretur, sed Deus ipse ad hominis futuri morem aedificandi respexisset. » *Opera omnia*, I, p. 98 ; *Le secret du monde*, Dédicace ancienne, trad. A. Segonds, p. 22. Je souligne.

pouvons conclure à l'existence d'un être ordonné qui l'ait modelé. Gardons-nous toutefois de voir là autre chose qu'un argument rhétorique : chez Kepler, dans l'ordre de certitude, l'existence de Dieu est première par rapport au constat d'un ordre dans l'univers, et non l'inverse. L'assurance de l'existence de Dieu permet d'assurer qu'il y ait effectivement un ordre dans l'univers, ordre qu'il n'était pas toujours évident de retrouver parmi les nouvelles données observationnelles de l'époque (notamment celles de Tycho Brahe). Nous pouvons remarquer plusieurs occurrences de ce renversement, qui me semble plus rapproché des réelles vues de Kepler. Je donne comme exemple celle qui se retrouve quelques pages plus loin, toujours dans le *Mysterium cosmographicum* :

À moins peut-être que nous ne pensions que Dieu a fait quelque chose dans le monde au hasard, alors qu'il avait d'excellentes raisons : pourtant personne ne me persuadera jamais de professer cette opinion, même à propos des étoiles fixes, dont pourtant la distribution nous paraît souverainement confuse, un peu comme une poignée de grains jetée à l'aventure.¹⁴⁸

Ainsi, lorsque l'ensemble des nouvelles données observationnelles semblera complètement aléatoire, jusqu'à paraître impossible à comprendre selon un modèle géométrique, c'est l'assurance de l'existence d'un ordre mathématique au sein de la nature qui permettra à Kepler de ne pas baisser les bras et de chercher à tout prix, dût-il recommencer cent fois, une régularité mathématique à l'intérieur du chaos apparent. Cette affirmation n'est pas sans nous rappeler la position de Platon, qui prône la supériorité du monde des Idées parfaites sur le monde sensible, pâle copie du premier. Il faut toutefois se rappeler que pour Aristote, également, tout est rationnel au sein de l'univers « car la nature ne fait rien au hasard »¹⁴⁹ ; cette assurance ne passe toutefois pas par l'idée d'une création divine à partir des mathématiques, mais plutôt par le principe selon lequel la nature tend habituellement vers le meilleur et que tout a une finalité.

Il est bon de rappeler ici que pour Kepler, la valeur théologique de sa quête est loin d'être négligeable en ce qu'elle donne sens à sa quête scientifique. Dès ses premières recherches en astronomie et en cosmographie, Kepler considère qu'il réalise par le fait même

¹⁴⁸ « Nisi forte Deum putabimus quicquam in mundo temere fecisse, dum rationes optimaе suppetent, id quod nemo mihi persuadebit, ut vel de fixis sentiam, quarum tamen situs maxime omnium confusus, quasi fortuitus sementis jactus nobis videtur. » *Opera omnia*, I, p. 123 ; *Le secret du monde*, II, trad. A. Segonds, p. 66.

¹⁴⁹ *Du ciel*, B, 8, 290a31 ; ARISTOTE (2003), trad. P. Moraux, p. 75.

son projet initial, celui auquel ses études en théologie le menaient. Il écrit d'ailleurs à son maître Michael Mästlin, dans une lettre datée du 3 octobre 1595 : « Je voulais être un théologien : longtemps j'ai été tourmenté : voilà que, par mon œuvre, Dieu est aussi glorifié dans l'astronomie. »¹⁵⁰ Par le biais de ses recherches scientifiques, Kepler croit pouvoir étudier et servir Dieu. Cette opinion sera davantage évidente dans une œuvre ultérieure de première importance, l'*Harmonice mundi* (1619), où Kepler sera convaincu d'avoir enfin rempli cette tâche en saisissant les archétypes (qui seront alors qualifiés non plus de géométriques mais d'harmoniques). Comme le remarque J. Kozhamthadam au sujet des harmonies archétypales: « He [*sc.* Kepler] was convinced that this assisted him greatly in his goal to read the mind and plan of God. »¹⁵¹ En effet, reconnaître les archétypes, c'est avoir accès aux modèles de la création, c'est-à-dire au plan divin. Par conséquent, l'harmonie pleinement réalisée est une forme de relation avec Dieu, comme une prière, et les recherches archétypales remplissent une fonction théologique : « Understanding God's will, as expressed in this Creation, becomes simultaneously the praising of God. Consequently, natural science on a quantitative basis is for Kepler at once the study and the service of God. »¹⁵²

En outre, cette quête théologique a donné à Kepler des motifs sérieux pour poursuivre ses recherches cosmographiques. Dieu ayant créé le monde selon un modèle géométrique, non seulement pouvons-nous saisir mathématiquement l'empreinte divine dans le monde, mais nous le devons afin d'honorer le Créateur. Le philosophe Jean-Luc Marion va jusqu'à prétendre que le Dieu képlérien correspond aux mathématiques elles-mêmes : « Dieu [*sc.* selon Kepler] est connu mathématiquement parce que lui-même est mathématicien; bien plus, Dieu ne pratique pas tant les mathématiques qu'il ne consiste en elles. »¹⁵³ Une telle affirmation me semble toutefois difficile à défendre à la lumière des textes que Kepler nous a laissés. Car si l'astronome croit profondément en un Dieu géomètre, il ne semble pas que ce dernier doive pour autant se réduire aux mathématiques. Celles-ci semblent plutôt former le langage divin par lequel Dieu s'exprime dans la création, langage que l'âme a également reçu en partage. Dans cette optique, Dieu se laisse connaître mathématiquement parce que l'âme

¹⁵⁰ « Theologus esse volebam : diu angebar : Deus ecce mea opera etiam in astronomia celebratur. » *Opera omnia*, I, p. 14 (ma traduction).

¹⁵¹ KOZHAMTHADAM (1994), p. 77.

¹⁵² KRAFFT (1991), p. 205.

¹⁵³ MARION (1981), p. 182.

partage en commun avec lui les mêmes idées archétypales. Je préfère donc une interprétation comme celle de G. Simon : « Mais si la mathématique peut servir de langage commun, c'est que plus fondamentalement elle révèle une étroite parenté d'essence. Elle n'est rien d'autre que la connaissance réflexive de ce qui dans l'homme est semblable à Dieu. »¹⁵⁴ Le fait de croire en un Dieu créateur du monde, loin de freiner l'astronome ici, le pousse à rechercher un ordre mathématique dans le monde : d'une part cet ordre existe, d'autre part il convient de le rechercher afin de remplir sa mission qui est de reconnaître les traces divines dans le monde et d'en percer le mystère. On voit donc que la croyance en un Dieu créateur, au lieu d'avoir freiné l'avènement de la révolution scientifique, est de première importance pour l'un de ses principaux acteurs : elle donne un sens à sa vocation scientifique tout en assurant que le monde soit ordonné.

En second lieu, il faut nous garder de voir dans cette croyance en un Créateur divin seulement la volonté, selon Kepler, de suivre l'enseignement des Saintes Écritures. Nous avons vu, au premier chapitre, en quel sens Kepler conçoit la Bible (*liber Scripturae*) comme étant en accord avec ce que l'étude de la nature (*liber naturae*) nous dicte : l'une ne prévaut pas sur l'autre, il s'agit plutôt de deux voies convergentes vers une seule et même connaissance universelle. Chez Kepler, la création du monde est une prémisse essentielle pour construire son astronomie : ayant été créé par Dieu, qui est parfait, le monde a été modelé « avec ordre et mesure », c'est-à-dire selon des régularités pouvant être éventuellement compréhensibles par la raison ; c'est donc dire que les mouvements célestes, notamment, peuvent être compris de façon mathématique. Au risque de me répéter, cette prémisse n'est pas de trop dans la science képlérienne : même si nous appliquions le fameux rasoir d'Ockham, qui prescrit de ne pas multiplier les entités au-delà de ce qui est nécessaire, le système képlérien ne saurait se passer de cette entité divine, parfaite et créatrice puisqu'elle est nécessaire pour justifier, *a priori*, que les régularités mathématiques permettant de décrire les mouvements célestes non seulement reflètent bel et bien la réalité, mais puissent être accessibles à l'être humain en tant que sujet connaissant. Cette importance de la création divine découle en fait de l'importance de la théorie des archétypes, dont elle est un élément

¹⁵⁴ SIMON (1979), p. 143.

clef, et dont nous ne pouvons faire l'économie pour envisager correctement la conception képlérienne de l'astronomie.

Cette mise en lumière de l'importance de la création divine m'amène à souligner que bien que Kepler n'ait pas écrit d'ouvrage proprement philosophique, il est possible de reconstruire une théorie de la connaissance chez cet astronome, invoquant notamment une forme de réminiscence empruntée à Platon et Proclus. Nous y reviendrons ; pour l'instant, il convient de voir d'abord comment Kepler s'inspire, de façon en apparence paradoxale, d'Aristote pour concevoir une astronomie nouvelle qui soit à la fois mathématique et physiquement adéquate.

Mathématiques vs physique

La mise en valeur de l'importance des mathématiques pour la Création touche un point crucial de la révolution astronomique : le fait de comprendre l'astronomie nouvelle comme une physique céleste dont l'on peut tirer des régularités mathématiques. Selon la tradition aristotélécienne, la physique et les mathématiques sont deux disciplines distinctes comportant chacune sa méthode et son objet propres ; Kepler se distingue donc radicalement du Stagirite lorsque vient le temps de proposer sa nouvelle science qui, nous l'avons vu au chapitre précédent, propose de jumeler description géométrique et explication physique. Cette volonté d'unir astronomie et physique se voit clairement annoncée dans le titre complet de l'*Astronomia nova*, qui va comme suit: « *Astronomia nova aitiológêtos, seu physicia coelestis tradita commentariis de motibus stellae Martis, ex observationibus G.V. Tychonis Brahe* »¹⁵⁵, soit « Astronomie nouvelle, fondée sur les causes, ou physique céleste, livrée à partir des commentaires sur les mouvements de l'étoile Mars, à partir des observations de Tycho Brahe. »

Nous référons habituellement à cet ouvrage par les deux premiers mots de son titre, qui mettent notamment en valeur le caractère novateur de l'ouvrage, bien que Kepler y fasse référence habituellement en usant d'un modeste « *Commentaria Martis* », soit

¹⁵⁵ *Opera omnia*, III, p. 135.

« Commentaires sur [la planète] Mars »¹⁵⁶. Les premiers commentateurs de Kepler ont plutôt mis l'accent sur la dernière partie de ce titre, soit l'apport des nouvelles données d'observation obtenues auprès de Tycho Brahe. Selon ce point de vue, la nouveauté annoncée dans le titre aurait été possible uniquement grâce au foisonnement de données précises et exactes, lesquelles permettaient de « constater » que la trajectoire de la planète Mars n'était plus reconstituée par une combinaison de cercles parfaits. Certes, la discordance entre les hypothèses et les observations sera un point majeur pour rejeter notamment les deux premiers modèles de Mars. Néanmoins, je crois tout comme A. Koyré que « la révolution astronomique a été, non seulement quant à son origine [...] mais aussi quant à son évolution, presque entièrement indépendante du développement de l'astronomie d'observation »¹⁵⁷. Dans l'*Astronomia nova*, la vérification empirique par rapport aux nouvelles données jouera certes un rôle clef pour l'abandon définitif du principe de circularité des mouvements célestes et nous ne saurions nier l'importance de ce volet empirique. Il n'en demeure pas moins que l'essentiel de la révolution, ce qui la rend possible et lui permet de se déployer est annoncé dans la première partie du titre : l'idée d'unir astronomie descriptive et fondements physiques. Cette volonté de fonder la première sur les deuxièmes est en soi une révolution, mais il est possible de constater que cela n'est pas aussi anti-aristotélicien que cela puisse paraître, de prime abord.

Du point de vue du contenu de la physique, Kepler a dû se distinguer complètement d'Aristote pour qui le corps céleste se meut uniquement selon un mouvement circulaire en vertu de la perfection du cercle sur toute autre figure¹⁵⁸. Pour certains¹⁵⁹, là réside la véritable révolution képlérienne : abandonner le paradigme circulaire pour adopter des trajectoires elliptiques. Nous analyserons en détail ce point crucial de la révolution dans le quatrième chapitre de cette thèse, où nous pourrions notamment constater que cette adoption d'une trajectoire elliptique propre aux corps célestes ne s'est pas faite sans heurts, que l'ellipse demeurera indissociable du cercle à l'intérieur duquel elle s'inscrit et que, une fois qu'il aura « vu » cette forme, Kepler passera beaucoup de temps à chercher une explication physique à

¹⁵⁶ Comme le remarque W.H. Donahue, qui choisit de donner le titre *New Astronomy* pour sa traduction, suivant l'usage et donnant par le fait même crédit à cet ouvrage : « It is no more than the book deserves. » KEPLER ([1609] 1992), p. 3.

¹⁵⁷ KOYRÉ (1961), p. 9.

¹⁵⁸ Cf. ARISTOTE, *Du ciel*, I, 2.

¹⁵⁹ Notamment HANSON (1961).

ce mouvement, afin de remplacer les arguments aristotéliens fondés entre autres sur la perfection du cercle. Ce n'est d'ailleurs que lorsque Kepler aura tout réuni au sein d'une conception harmonique du monde dans l'*Harmonice mundi* qu'il sera vraiment convaincu d'avoir percé le véritable secret du monde. Pour l'instant, nous nous contentons de remarquer ce besoin qu'aurait Kepler de trouver de nouvelles fondations physiques pouvant rendre compte des mouvements observés.

Un autre point de divergence évident quant au contenu physique est bien sûr l'abandon du géocentrisme aristotélien et ptoléméen au profit de l'héliocentrisme, pour les raisons métaphysiques et théologiques évoquées au chapitre 1. Cette conception héliocentrique, faisant de la Terre une planète comme les autres, semait la voie à l'abandon de la coupure traditionnelle physique terrestre / physique céleste – coupure déjà entamée suite à l'observation, par Tycho Brahe, d'une nouvelle étoile dans le ciel en 1572 et relatée dans son *De Stella nova* (1573), montrant par là que l'éther pouvait être corruptible¹⁶⁰. Nous pouvons facilement constater que, bien que Kepler élabore plusieurs notions physiques uniquement propres au monde céleste (par exemple, la *species* dotée d'une *virtus motrix* émanant du Soleil ou la *vis insita* inhérente aux planètes), les forces qui régissent les cieux ne doivent pas être fondamentalement différentes de celles dont nous pouvons voir l'effet sur la Terre. J'en prends pour exemple la force magnétique, que nous verrons à la section 3.4 : le traité *De magnete* de Gilbert au sujet de cette force invisible et qui agit à distance eut une profonde influence sur les recherches képlériennes, qui croyait voir là une cause possible (ou qui lui soit analogue) de la trajectoire des planètes, mues également à distance par une force invisible. Une autre conséquence importante de l'adoption de l'héliocentrisme sur le plan du contenu de la physique est la nécessité de trouver une nouvelle explication quant au fait que la Terre et ses objets se tiennent ensemble, argument traditionnellement invoqué contre le mouvement de la Terre. La physique aristotélienne expliquait bien cet état de fait en affirmant que les objets lourds avaient une tendance naturelle à se mouvoir vers le centre du monde, soit le centre de la Terre. L'héliocentrisme posait donc un sérieux défi pour qui cherchait à trouver une explication physique à ce phénomène (rappelons qu'il faudra attendre Newton pour qu'une loi

¹⁶⁰ Kepler remarque d'ailleurs dans l'*Astronomia nova* que Tycho a apporté suffisamment d'arguments contre la solidité des orbites. Cf. *Opera omnia*, III, p. 177 ; *Astronomia nova*, II, p. 126. Mais nous avons vu, au chapitre 1 (section 1.1) de cette thèse, que dès l'époque du *Mysterium cosmographicum* Kepler avait déjà l'opinion selon laquelle les archétypes mathématiques n'étaient pas matériels.

de la gravité soit proposée). Kepler s'en sort toutefois dès l'introduction de l'*Astronomia nova*, en proposant que les objets terrestres et la Terre elle-même se regroupent autour de son centre en vertu d'une disposition naturelle des corps à être attirés par leurs semblables (*cognata corpora*)¹⁶¹.

Certes, l'exigence képlérienne de faire en sorte que les résultats en astronomie et en physique coïncident n'est pas en soi si nouvelle ; il s'agit là simplement d'une exigence de cohérence, naturelle pour la raison humaine. Par exemple, nous ne sentons pas la Terre bouger et nous observons que les éléments lourds ont tendance à tomber sur le sol ; la physique de l'époque rend compte de ces phénomènes en nous expliquant que les éléments lourds, par nature, ont une propension à se diriger vers le centre du monde, centre de la Terre immobile ; il est donc naturel que l'astronomie reconstruise le mouvement des cieux en posant le centre du monde comme étant celui de la Terre, immobile. Devant cette exigence de cohérence, une révolution astronomique impliquait nécessairement une révolution physique, et là réside une des étapes fondamentales franchie par Kepler et menant à la révolution scientifique : non pas exiger une cohérence, mais plutôt comprendre que devant les contradictions entre modèle héliocentrique et physique aristotélicienne, c'est cette dernière qu'il allait falloir abandonner et reconstruire. Cela dit, il convient de remarquer que cette exigence de cohérence allait encore plus loin chez Kepler : dans l'*Astronomia nova*, on passe d'une simple cohérence à un lien de causalité, ce qui constitue un saut conceptuel important qu'il convient d'examiner de près à l'instant.

La distinction par rapport à Aristote s'est donc également faite quant à la conception même de la physique céleste. C'est ce volet qui m'intéresse davantage ici et qui me semble relever d'un héritage plus aristotélicien qu'on a pu le penser. La nouvelle astronomie képlérienne, « fondée sur les causes » comme l'annonce le titre de son ouvrage, exige qu'elle soit ancrée dans la physique ; on doit donc conjuguer reconstruction géométrique (propre à l'astronomie traditionnelle) et principes physiques, et l'on obtient pour résultat une physique céleste où l'on est en quête de relations quantitatives permettant de rendre compte de la structure des cieux et des mouvements célestes. Or, conçue selon l'aristotélisme prévalent à

¹⁶¹ Certains commentateurs ont vu là une forme de théorie de la gravité, mais comme l'a bien montré DAVIS (1992), la gravité chez Kepler demeure un phénomène local et n'est pas un principe évoqué pour rendre compte de la trajectoire des planètes.

l'époque, la physique est l'étude des corps en mouvement et elle est donc une discipline qualitative ; abstraire une loi mathématique consiste à étudier l'être selon la quantité et s'éloigne des objectifs de la physique. Aristote précise bien dans sa *Métaphysique* que les mathématiques sont une science abstraite, écartant toutes les qualités sensibles des objets : « il [sc. le mathématicien] considère, en effet, son objet en faisant abstraction de tous ses caractères sensibles, tels que la pesanteur et la légèreté, la rigidité et son contraire, ainsi que la chaleur et le froid et tous autres couples contraires d'ordre sensible [...]. »¹⁶² Le mathématicien ne saurait donc nous renseigner sur la nature des objets sensibles : « de quelles choses faut-il dire que s'occupe le mathématicien ? Ce n'est sûrement pas des objets sensibles, car aucun d'eux ne possède les propriétés requises par les sciences mathématiques »¹⁶³. Cela dit, il ne s'agit pas de dire que les objets mathématiques existent indépendamment des objets sensibles¹⁶⁴ ; seulement, ils relèvent de la matière intelligible, présente dans les objets sensibles mais séparable par notre esprit qui les envisage alors sans leurs caractéristiques sensibles : « la matière sensible, c'est celle qui est comme l'airain, le bois, ou toute matière susceptible de mouvement ; la matière intelligible est celle qui se trouve bien dans les êtres sensibles, mais non en tant que sensibles, comme les êtres mathématiques. »¹⁶⁵ Autrement dit, selon Aristote, les propriétés mathématiques des objets sont seulement des propriétés accidentelles des corps en mouvement (en les envisageant selon la quantité) et de telles abstractions ne sont pas aptes à nous renseigner à l'intérieur de la physique (terrestre ou céleste). L'apport principal de Kepler peut être conçu comme étant d'avoir développé une métaphysique selon laquelle les propriétés mathématiques des objets sont en fait leurs propriétés essentielles¹⁶⁶ ; ainsi, la physique devient mathématique par nature, le monde ayant été créé à l'image des archétypes mathématiques (géométriques et harmoniques).

Une part importante de la révolution scientifique se serait donc jouée ici : concevoir l'astronomie non plus comme une discipline simplement descriptive, visant à « sauver les

¹⁶² *Métaphysique*, K, 3, 1061a28-32. ARISTOTE (1991), trad. J. Tricot, pp. 110-111 (traduction modifiée).

¹⁶³ *Métaphysique*, K, 1, 1059b12-12. ARISTOTE (1991), trad. J. Tricot, p. 102.

¹⁶⁴ Cela est affirmé à plusieurs reprises par Aristote, par exemple en *Métaphysique*, M, 3, 1078 a2-5.

¹⁶⁵ *Métaphysique*, Z, 10, 1036 a9-12. ARISTOTE (1991), trad. J. Tricot, p. 279.

¹⁶⁶ Telle est la formulation de MARTENS (2000), p. 4.

apparences »¹⁶⁷, mais comme une discipline également explicative, consistant en l'étude des régularités mathématiques (relatives au cercle ou non) découlant directement des exigences de la physique (se penchant sur les causes du mouvement et fondée ultimement sur des arguments *a priori*) et reconstituables à partir des données observationnelles. Un exemple de cette double exigence a été vu au chapitre 1, lorsque nous remarquons que Kepler reprochait à Copernic, dès le *Mysterium cosmographicum*, d'avoir placé le Soleil moyen (*Sol medius*, soit l'endroit où le Soleil se tiendrait s'il était immobile, ce qui correspond au centre de l'orbite terrestre) et non le Soleil vrai¹⁶⁸, (*Sol apparens* soit le Soleil tel qu'il nous apparaît) comme centre du monde¹⁶⁹. Nous avons vu alors les arguments métaphysiques et théologiques qui sous-tendaient cet héliocentrisme pur et dur (par exemple, la noblesse du Soleil) ; maintenant, le rejet du *Sol medius* trouve une autre justification dans cette exigence de causalité : si tout mouvement reconstruit par les astronomes doit avoir une cause physique, alors il est impossible qu'un point vide, purement mathématique (ici, le centre de l'orbite terrestre chez Copernic, mais nous aurions pu mentionner les points équants, présents chez Ptolémée) puisse trouver une place d'importance dans la reconstruction des mouvements célestes¹⁷⁰. C'est exactement cet argument qu'il faut lire derrière l'extrait suivant, qui peut sembler étrange à nos yeux contemporains puisque Kepler attribue des « intelligences » aux planètes :

D'ailleurs, qu'une quelconque intelligence indique un trajet circulaire sans recours à un centre ou un quelconque corps, cela est impossible. Car un cercle est défini et amené à la perfection par cela même, soit son égale distance au centre. [...] Qui donc

¹⁶⁷ Ce qui était l'objectif traditionnel des astronomes tel qu'énoncé par Simplicius lorsqu'il commente la *Physique* d'Aristote, où il fait remonter à Platon cette exigence instrumentaliste de reconstruction des observations planétaires par des mouvements circulaires uniformes réguliers . Cf. DUHEM ([1908] 2003), pp. 13-14.

¹⁶⁸ Il peut sembler étrange de traduire « Soleil apparent » par « Soleil vrai ». Nous gardons toutefois cette dénomination, suivant la tradition, d'autant plus qu'elle ne nous semble pas fautive quant au sens : il s'agit de la position où le Soleil semble se trouver réellement.

¹⁶⁹ Cette idée est d'une importance si capitale pour la réforme de l'astronomie qu'elle a poussé Gingerich à proposer de l'appeler la « *zeroth law* » (GINGERICH, 1975). Je suis tout à fait en accord à l'effet que cette idée était un pas de géant vers la nouvelle astronomie. Cela se vérifie également dans les recherches exposées dans l'*Harmonice mundi* où il s'agit d'un présupposé essentiel à la découverte et la justification de la troisième loi de Kepler.

¹⁷⁰ C'est pour la même raison que Kepler rejette les épicycles.

montrera à la planète ce point de départ, à partir duquel elle va poursuivre le chemin restant ?¹⁷¹

Attribuer une telle « intelligence » (*mens*) aux planètes aurait pu relever d'une explication physique simpliste, voire archaïque. Or ce n'est pas le cas chez Kepler : ces intelligences ne sont posées que pour s'assurer que les planètes puissent « connaître » la trajectoire à suivre, ce qui est impossible si elles doivent se calibrer autour d'un point vide. En d'autres mots, elles ne font qu'exprimer l'exigence de trouver une causalité physique derrière tout mouvement céleste, même lorsque cela demeure une tâche difficile, comme l'a bien relevé Miller : « Kepler uses minds as stand-ins for physical mechanisms he does not understand »¹⁷². Et éventuellement, le centre du monde deviendra la cause du mouvement des planètes autour de lui et la force motrice trouvera son siège dans le Soleil, se diffusant à distance un peu comme notre astre diffuse sa lumière¹⁷³.

Kepler passe également beaucoup de temps à montrer que l'adoption du Soleil vrai est compatible avec les observations, et ce sont surtout des arguments de ce type que nous retrouvons dans l'*Astronomia nova* :

Une porte est donc ouverte pour nous afin de décider à **partir des observations de ce que j'ai déduit *a priori* et en considérant les causes du mouvement** : que la ligne des apsides, qui est la seule ligne divisant le chemin de la planète en deux demi-cercles égaux en vigueur et en taille, cette ligne, dis-je, passe par le centre même du corps du Soleil et non (comme les spécialistes l'ont placée) au-delà du Soleil. Durant ce travail je vais démontrer cela à partir des observations, dans les parties 4 et 5.¹⁷⁴

¹⁷¹ « Porro ut mens aliqua viam monstret circulem citra metam vel centri vel corporis alicujus. Quor pro accusu vel recessu majore vel minore angulo appareat, id fieri nequaquam potest. Circulus enim iisdem et definitur et perficitur, aequalitate scilicet distantiae a medio [...]. Quis ergo planetae hoc initium ostendet, ex quo reliquum iter conformet ? » *Opera omnia*, III, p. 178 ; *Astronomia nova*, II, p. 128 (ma traduction).

¹⁷² MILLER (2008), p. 45.

¹⁷³ Toutes ces étapes seront soigneusement analysées dans le prochain chapitre.

¹⁷⁴ « Aperta igitur est nobis janua **per observationes** quoque statuendi de eo, **quod a priori et a consideratione causarum motricium deduxeram** ; scilicet lineam apsidum planetae, quae sola bisecat iter planetae in duos semicirculos aequales vigore et quantitate, hanc inquam lineam non praeter Solem (ut artificibus placet), sed per ipsum centrum corporis Solis transire. Hoc autem insuccessu operis demonstrabo ex observationibus parte quarta et quinta. » *Opera omnia*, III, p. 199 ; *Astronomia nova*, VI, p. 167 (ma traduction). Je souligne.

Ces arguments empiriques seront très utiles à Kepler mais ne seront, comme toujours, pas suffisants en soi pour adopter cet héliocentrisme absolu, lequel a déjà été déduit par la physique qui fonctionne, comme on le voit bien dans l'extrait, *a priori*. Kepler exprime bien ce sentiment d'insuffisance dans une lettre à Longomontanus datée de 1605, alors qu'il travaille sur une hypothèse alternative (< *hypothesis vicaria* >), qui consiste en une bonne approximation pour calculer les positions des planètes à partir de cercles parfaits centrés autour du centre de l'orbite terrestre : « J'ai une hypothèse, construite depuis maintenant 4 années, qui me donne très exactement le lieu d'une planète sur sa position excentrique. Mais elle ne me plaît pas, parce qu'elle n'est pas physique, mais à vrai dire, ce qui est appelé une hypothèse »¹⁷⁵. Cette hypothèse alternative sera éventuellement rejetée pour des raisons observationnelles ; mais tout au long de ces recherches sur ce modèle, Kepler entretient un doute face à cette technique calculatoire qui, bien que pratique, lui semble non fondée.

Nous le verrons lorsque nous nous pencherons en détail sur les arguments de l'*Astronomia nova*, cette exigence de fondation physique sera à la fois un moteur et un frein dans sa quête : un puissant moteur heuristique en incitant le chercheur à se pencher entre autres sur les distances au Soleil pour prédire les trajectoires planétaires ; un obstacle en interdisant potentiellement à Kepler d'adopter l'ellipse comme trajectoire, puisque cette trajectoire semblait incompatible avec une explication physique des causes du mouvement. Comme le remarque Miller :

Kepler does not see how an elliptical orbit, which he is convinced accurately describes the Martian orbit, could be *explained*. Yet, Kepler thought, if the orbit is inexplicable, it is *impossible*, despite its empirical accuracy. Without a plausible explanation, the ellipse would have to be rejected.¹⁷⁶

Par « explication plausible », il faut comprendre la recherche de causes physiques permettant de rendre compte de la description géométrique observée. Ainsi, les « intelligences » des planètes ne sont pas suffisantes en soi pour expliquer qu'elles dévient d'un mouvement circulaire uniforme autour du Soleil.

¹⁷⁵ « Hypothesin habeo, jam ante 4 annos constructam, quae mihi planetam in eccentrico debitis locis sistit scrupulosissime. Sed non placet mihi, quia non est physica, sed vere id quod dicitur, hypothesis. » *Opera omnia*, III, p. 34 (ma traduction).

¹⁷⁶ MILLER (2008), p. 49.

L'astronomie nouvelle proposée par Kepler implique deux choses : d'une part, que l'astronomie, cet art de reconstruire les mouvements célestes au moyen de la géométrie, soit fondée en tout temps sur des raisons physiques (c'est là ce qu'on pourrait appeler le physicalisme¹⁷⁷ de Kepler) et aspire à être davantage qu'une simple tâche descriptive visant à sauver les phénomènes ; d'autre part, que la physique, cette étude de la nature, trouve ses réponses ultimes à l'intérieur des mathématiques. On a beaucoup insisté sur la nouveauté d'une approche causale en astronomie, tout comme on a mis l'accent sur l'héritage pythagoricien ayant porté cette conception d'un monde physique essentiellement mathématique. Néanmoins, je suis d'avis qu'il convient d'y voir, dans ces deux cas, davantage de similitude avec les idées d'Aristote et pour ce faire, il suffit de se pencher sur les tâches multiples de l'astronomie nouvelle que nous avons vues dans les chapitres précédents.

L'astronomie comporte plusieurs tâches

Le tableau de la page suivante (**Tableau 1**) permet de voir et de comparer comment se présentent les multiples tâches de l'astronome, selon la tradition et selon ce qui est exposé dans quatre des ouvrages majeurs de Kepler¹⁷⁸ :

¹⁷⁷ Comme le remarque DIEDERICH (2001), p. 19.

¹⁷⁸ Les contenus du *Mysterium cosmographicum* et de l'*Apologia* ont été analysés respectivement dans les deux chapitres précédents ; celui de l'*Astronomia nova* le sera dans le chapitre 4 ; enfin, celui de l'*Harmonice mundi* l'a été dans mon mémoire de maîtrise. Cf. RIVERIN (2007).

	Tradition	<i>Mysterium cosmographicum</i> (1596 / 1621)	<i>Apologia pro Tychone contra Ursum</i> (œuvre posthume, écrite en 1600)	<i>Astronomia nova</i> (1609)	<i>Harmonice mundi</i> (1619)
Expliquer, <i>i.e.</i> rechercher les causes (<i>a priori</i>) des mouvements célestes	Physique céleste (cercles parfaits, mouvements uniformes)	Cosmographie (archétypes géométriques)	Astronomie contemplative (trajectoires vraies et authentiques)	Physique (magnétisme, <i>virtus motrix</i> , intelligences planétaires et principes unificateurs)	Harmonie (archétypes harmoniques)
Décrire, <i>i.e.</i> reconstruire les mouvements célestes à partir des observations (<i>a posteriori</i>)	Astronomie	Astronomie	Formation d'hypothèses géométriques	Arguments à partir des observations	Recherche empirique des proportions justes
Recueillir des observations (<i>explananda</i>)	Tâche effectuée par les astronomes de l'école d'Alexandrie (incluant Hipparque)	Kepler utilise les mêmes données que Copernic (qui sont à peu près celles de Ptolémée)	Astronomie mécanique et pratique	Tâche effectuée par Tycho Brahe	Kepler utilise en grande partie les mêmes données que Tycho Brahe

Tableau 1. Les différentes tâches de l'astronome selon la tradition et quatre ouvrages de Kepler

Dans tous les cas, les volets explicatif et descriptif sont présents. Kepler se distingue toutefois de la tradition par l'importance accordée à chacun de ces volets : alors qu'à son époque, l'astronomie était essentiellement descriptive, calculatoire et prédictive, Kepler donne une importance beaucoup plus grande au volet explicatif (même dans l'*Astronomia nova*, où beaucoup d'efforts sont pourtant déployés pour la tâche calculatoire). Or c'est là une chose qu'Aristote reproche aux Pythagoriciens, qui affirment que la Terre tourne autour d'un feu et qu'il existe une Antiterre, donnant ainsi une priorité trop grande à leur système explicatif :

Loin de chercher à régler sur les faits observés leurs raisonnements et leurs explications par les causes, ils contraignent les faits observés à rentrer dans le cadre de certains raisonnements et de certains avis personnels auxquels ils s'efforcent de faire correspondre leur organisation du monde.¹⁷⁹

Cette critique pourrait être valable contre ce qui est déployé dans le *Mysterium cosmographicum*, malgré ce que Kepler affirme. En effet, d'une part nous y retrouvons ce désir de faire concorder son système avec les données d'observations : « Passons maintenant à l'examen des "distances" des orbites de l'astronomie et aux démonstrations géométriques : si tout cela ne s'accorde pas, alors sans aucun doute tout le travail antérieur n'aura été qu'un plaisant divertissement. »¹⁸⁰ Mais lorsque cette comparaison sera effectuée dans la pratique, Kepler n'appliquera pas tout à fait cette exigence : « Car ce n'est certainement pas par hasard que les proportions des corps sont **si voisines** de ces intervalles, entre autres raisons parce que l'ordre de ces intervalles est le même que celui que j'ai attribué aux corps en vertu des excellentes raisons présentées plus haut. »¹⁸¹ Il est vrai que les données sont « voisines » de ce que celles que son système prévoyait, mais elles sont certainement loin d'y correspondre exactement. Or Kepler ne renoncera pas à son modèle cosmographique pour autant, jugeant que les données d'observation sont insuffisantes et imparfaites et que ce serait une grave erreur d'y voir « la moindre occasion de rejeter toute cette entreprise à cause d'une très légère contradiction [...] »¹⁸² alors que son modèle fondé sur les archétypes semble si prometteur. Dans l'*Astronomia nova*, l'exigence de concordance avec les observations sera plus grande, au point où elle amènera Kepler à rejeter son *hypothesis vicaria* (en la conservant néanmoins comme moyen de calcul des longitudes) suite à un écart de 8 minutes d'arc entre les données prédites et celles observées ; néanmoins, nous avons vu plus haut que Kepler était fort insatisfait de cette hypothèse d'abord et avant tout pour des raisons non empiriques. Quant au premier modèle de Mars, nous verrons qu'il sera rejeté non pas seulement en vertu de son

¹⁷⁹ *Du ciel*, II, 13, 293a25-30 ; ARISTOTE (2003), trad. P. Moraux, p. 85.

¹⁸⁰ « Transeamus modo ad 'aposémata' orbium astronomiae et demonstrationes geometricas : quae nisi consentiant, procul dubio omnem praecedentem operam luserimus. » *Opera omnia*, I, p. 148; *Le secret du monde*, XIII, trad. A. Segonds, p. 117.

¹⁸¹ « Certe enim fortuitum hoc esse non potest, ut **tam propinque** sint intervallis hisce proportiones corporum, cum propter alia, tum maxime, quia idem ordo est intervallorum, quem supra rationibus optimis corporibus ascripsi. » *Opera omnia*, I, p. 152; *Le secret du monde*, XIV, trad. A. Segonds, p. 128. Je souligne.

¹⁸² « occasionem ullam praebeam totum hoc negotium propter leviculam discordiam rejiciendi [...] ». » *Opera omnia*, I, p. 153; *Le secret du monde*, XV, trad. A. Segonds, p. 129.

écart avec les données observationnelles, mais aussi parce que la stratégie qu'il faudrait employer pour le « sauver » (soit la libration du point équant) sera jugée inconciliable avec les raisons naturelles, c'est-à-dire les fondements physiques. On peut donc dire, sans se tromper, que l'importance du volet « explicatif » en astronomie chez Kepler se distinguait radicalement de la tradition qui se contentait de « sauver les apparences », et d'Aristote lui-même qui le formule ainsi dans les *Premiers analytiques* :

Je veux dire que, par exemple, c'est l'expérience astronomique qui fournit les principes de la science astronomique, car ce n'est qu'une fois les phénomènes célestes convenablement appréhendés, que les démonstrations de l'astronomie ont été découvertes. Il en est de même pour n'importe quel autre art ou science.¹⁸³

Cette volonté de proposer une astronomie fondée sur la physique, tout comme cette union de la physique et des mathématiques, allaient toutes deux contre l'exigence de bien séparer les tâches qui était prescrite par Aristote lui-même dans les *Seconds analytiques*, œuvre qui était familière à Kepler¹⁸⁴ et où il y est prescrit de ne pas prouver ce qui est dans un genre par un autre genre¹⁸⁵. Bien sûr, nous le voyons dans la plupart des extraits étudiés jusqu'à présent, Kepler respecte tout de même en un sens cette injonction (qu'il semble adopter également) en distinguant soigneusement et explicitement les démonstrations géométriques des démonstrations physiques¹⁸⁶, obtenant ainsi deux tâches différentes (bien que cohérentes) en vue d'un but commun : percer le mystère cosmographique. Il n'en demeure pas moins que Kepler devait trouver une façon de rendre ces deux nouvelles opérations crédibles pour ses lecteurs contemporains ; Aristote lui-même allait lui montrer une piste de solution.

¹⁸³ *Premiers analytiques*, I, 30, 46a18-22 ; ARISTOTE (1946), trad. J. Tricot, p. 158.

¹⁸⁴ Cf. MARTENS (2000), p. 184, n. 10.

¹⁸⁵ Cf. *Seconds analytiques*, II, 7.

¹⁸⁶ Je suis tout à fait en accord ici avec R. Martens : « he [*sc.* Kepler] also emphasized that each discipline be considered separately. Only then could the parts be put together. This respect for disciplinary boundaries is very Aristotelian. » MARTENS (2000), p. 106.

Une astronomie fondée sur la physique

Nous avons vu, dans notre étude¹⁸⁷ du *Mysterium cosmographicum*, que Kepler y formule son projet d'élaborer une cosmographie, tâche qui va au-delà de l'astronomie descriptive en ce qu'elle cherche les causes véritables de la disposition et du mouvement des planètes, de sorte qu'elles doivent expliquer pourquoi il en va ainsi et pas autrement. J'y vois nettement l'influence de ce passage tiré des *Seconds analytiques* d'Aristote :

Nous pensons **connaître scientifiquement** chaque chose **au sens absolu**, et non pas à la manière sophistique par accident, lorsque nous pensons connaître **la cause** du fait de laquelle la chose est, savoir **que c'est bien la cause** de la chose et que cette chose **ne peut pas être autrement** qu'elle n'est.¹⁸⁸

Cette façon d'envisager la science comme une discipline se penchant sur les causes, Kepler l'applique à l'astronomie en lui octroyant une vocation explicative forte et en demandant à ce qu'elle soit fondée dans une physique *a priori*. Ultimement, ce sont les archétypes (géométriques puis harmoniques) qui peuvent fournir l'appareil épistémologique nécessaire pour répondre à des questions telles que « pourquoi y a-t-il six planètes? », questions dont ne peut se passer l'astronome qui s'acquitte correctement de ses tâches. Ces explications archétypales ne peuvent toutefois pas remplacer les explications physiques comme telles. En termes aristotéliens, nous pourrions dire que les causes formelles ne peuvent tenir lieu de causes efficientes, sans quoi il serait tout à fait concevable d'accorder, par exemple, un pouvoir moteur à un point mathématique vide. Et de fait, si les explications physiques n'avaient été qu'archétypales selon Kepler, ce dernier ne se serait pas beaucoup distingué de ses prédécesseurs qui ne cherchaient qu'à reconstruire géométriquement les mouvements des cieux de façon circulaire. Or ce n'est pas le cas : certes la physique sera mathématique par nature, mais en aucun cas les archétypes seuls ne pourront enlever l'exigence de trouver des explications s'accordant avec la « nature des choses », distinction aristotélienne s'il en est.

C'est donc dire que pour Kepler, non seulement l'astronomie comporte plusieurs tâches, mais il en va de même pour la physique, qui sera à la fois qualitative et quantitative. La

¹⁸⁷ Au chapitre 1 de cette thèse.

¹⁸⁸ *Seconds analytiques*, I, 2, 71b9-12 ; ARISTOTE (2005), trad. P. Pellegrin, p. 67. Je souligne.

distinction képlérienne de ces deux sens ou fonctions de la physique a été relevée notamment par l'historien des sciences Robert Westman, lequel formule ainsi cette distinction :

We may phrase the first sense in the following way : a mathematical hypothesis is physically true when it corresponds directly to real bodies in space and describes their motions in the simplest and most regular possible manner. There are really two requirements underlying this first meaning – capacity to describe physical reality and simplicity – and Kepler believes that these conditions mutually imply one another.¹⁸⁹

Ce premier sens de la physique peut se comprendre comme étant l'exigence de fonder physiquement toute entreprise descriptive. D'où l'importance du principe de simplicité (vu au chapitre 1) dont il faut tenir compte dans la reconstruction des mouvements célestes, de même que le rejet du Soleil moyen. Le commentateur Bruce Stephenson, dans son ouvrage éclairant sur l'astronomie physique de Kepler, constate également deux types de physique chez cet astronome. Il décrit ainsi celle qui se rapporte au premier sens de Westman : « finding the unifying principles from which observed phenomena could be mathematically deduced »¹⁹⁰. Stephenson y voit le versant moderne de la nouvelle physique créée au XVII^{ème} siècle et c'est essentiellement sur ce type de physique qu'il met l'accent dans son ouvrage. L'autre sens de la physique relevé par Westman est plutôt dynamique, en quête des causes du mouvement :

This brings us to the second interpretation of 'physica' which seems to derive from Aristotle's 'efficient cause'. If we are dealing with real bodies moving freely in space (rather than with angles alone or solid orbs), then perforce we are confronted with the problem of the causes and components of motion.¹⁹¹

Cette quête des causes relative à la physique médiévale, dérivée d'Aristote, est jugée moins pertinente pour Stephenson eu égard à ses objectifs, alors qu'il préfère mettre l'accent sur le premier volet de la physique dans son analyse de l'*Astronomia nova*. Pour ma part, je choisis d'inclure les deux sens de la physique képlérienne partout où ce sera pertinent pour nous permettre de bien comprendre l'itinéraire rationnel menant aux découvertes étayées dans cet ouvrage. Comme le remarque lui-même Westman, par rapport à ce qui est exposé dans l'introduction de l'*Astronomia nova* : « [...] the two senses of *physica*, descriptive and causal, [...] are brought together explicitly as mutually-supporting pillars in the Copernican

¹⁸⁹ WESTMAN (1972), p. 239.

¹⁹⁰ STEPHENSON (1987), p. 5.

¹⁹¹ WESTMAN (1972), p. 242.

edifice. »¹⁹² Je crois même que séparer les deux aspects de la physique képlérienne ne doit se faire que pour nous rappeler sa conception riche et approfondie d'une science dont les objectifs dépassent la tâche purement descriptive et instrumentale ; tâche explicative qui semble elle-même encouragée par ce qui est présenté dans les *Seconds analytiques*.

Une autre influence de ce traité d'Aristote se trouve dans la conception képlérienne de la méthode astronomique, que nous avons vue principalement dans l'*Apologia*¹⁹³. Nous avons vu précédemment que cette méthode fonctionnait essentiellement par syllogismes, ce qui est évidemment inspiré par les *Seconds analytiques*, par exemple dans ce passage :

S'il existe un autre genre du savoir scientifique, nous le dirons plus tard, mais nous disons aussi que connaître scientifiquement c'est savoir par démonstration. J'appelle « démonstration » un syllogisme scientifique, et j'appelle « scientifique » un syllogisme dont la possession fait que nous avons un savoir scientifique.¹⁹⁴

Rappelons-nous que pour Kepler, le processus de démonstration s'effectue en deux sens : d'abord, au niveau temporel, à partir des données d'observation, l'astronome tire des conclusions; ensuite, au niveau logique, les données d'observation (actuelles et à venir) doivent plutôt tenir lieu de conclusions tirées des hypothèses astronomiques, lesquelles sont les véritables points de départ. On renverse donc le processus pour obtenir une véritable science, tout comme chez Aristote, qui relève que l'on peut renverser un syllogisme du fait (puisque le plus connu est parfois ce qui peut être observé) pour obtenir le syllogisme du pourquoi, qui est le propre de la science :

Connaître scientifiquement le fait < *tò hóti* > et le pourquoi < *tò dióti* > sont des choses différentes. [...] En effet, rien n'empêche que des deux termes de la prédication ce soit parfois **celui qui n'est pas cause qui soit le mieux connu**, de sorte que **c'est par lui que se fait la démonstration**. Par exemple quand on démontre que les planètes sont proches par le fait qu'elles ne scintillent pas. Soit C "les planètes", B "ne pas scintiller", A "être proche". Il est, de fait, vrai d'affirmer B de C, car les planètes ne scintillent pas, mais aussi A de B, car ce qui ne scintille pas est proche. Admettons cette dernière proposition par induction < *di' epagogês* >, ou par la perception < *di' aisthêseos* >. Il est donc nécessaire que A appartienne à C, de

¹⁹² WESTMAN (1972), p. 247.

¹⁹³ Au chapitre 2 de cette thèse.

¹⁹⁴ *Seconds analytiques*, I, 2, 71b16-19 ; ARISTOTE (2005), trad. P. Pellegrin, p. 67.

sorte qu'on a démontré que les planètes sont proches. C'est donc là un **syllogisme** non pas du pourquoi mais **du fait**, car ce n'est pas parce qu'elles ne scintillent pas que les planètes sont proches, mais parce qu'elles sont proches qu'elles ne scintillent pas. Mais il se peut aussi que l'on montre ceci par cela, et l'on aura la démonstration du pourquoi. Par exemple soit C "les planètes", B "être proche", A "ne pas scintiller". Alors B appartient encore à C, de sorte que A, "ne pas scintiller" appartient à la fois à C et à B. Et on a le **syllogisme du pourquoi** ; en effet on a pris la cause première.¹⁹⁵

Cette façon de procéder par renversement de syllogismes, Kepler l'applique encore une fois à l'astronomie et se montre donc, encore une fois, beaucoup plus aristotélien que l'on a pu le penser lorsqu'il procède à cette opération. Néanmoins, la différence demeurera dans le type de cause que Kepler admettra en A : selon lui, éventuellement, la cause formelle (tirée des mathématiques) pourra répondre aux questions de la physique céleste, ce que ne permettrait pas Aristote. Car si, selon ce dernier, l'astronomie est située à mi-chemin entre mathématique et physique, elle ne garantit pas pour autant l'union entre les deux.

En effet, pour Aristote, l'astronomie fait partie d'un ensemble de sciences subordonnées ou mixtes que la tradition médiévale a regroupées sous le terme « sciences intermédiaires » (entre la physique et les mathématiques) et qui englobe des disciplines comme l'optique, l'harmonique et la mécanique, soit des sciences qui appliquent à la matière sensible des principes mathématiques. Les propos d'Aristote à ce sujet sont parfois subtils mais cet extrait de la *Physique* me semble éclairant (à noter que ce qui est dit à propos de l'optique est également valable pour l'astronomie) :

Mais [que les réalités physiques soient moins séparables que les réalités mathématiques,] les parties plus physiques des mathématiques, comme l'optique, l'harmonique, l'astronomie le montreraient aussi. Car, d'une certaine manière, elles procèdent à l'inverse de la géométrie : la géométrie, en effet, examine la ligne physique, mais pas en tant que physique, alors que l'optique étudie la ligne mathématique, non pas en tant que mathématique, mais en tant que physique.¹⁹⁶

Autrement dit, l'astronomie considère les principes géométriques (qui ont été auparavant abstraits de la matière) en les réappliquant à nouveau à des choses matérielles. En ce sens,

¹⁹⁵ *Seconds analytiques*, I, 13, 78a22-b4 ; ARISTOTE (2005), trad. P. Pellegrin, pp. 131-133. Je souligne.

¹⁹⁶ *Physique*, II, 2, 194a7-12 ; ARISTOTE (2000), trad. P. Pellegrin, p. 123 (traduction modifiée).

l'astronomie demeurera physique d'une part (puisque son objet requiert absolument la matière sensible) mais constituera néanmoins une partie de la géométrie, à qui elle sera subordonnée quant à la démonstration puisque ce qui est vrai d'une ligne est aussi vrai d'une ligne-visible et matérialisée¹⁹⁷. On a donc bien une science intermédiaire, où « au genre mathématique est ajoutée une chose *extérieure* à la nature de ce genre, comme le visible est ajouté à la ligne [...] »¹⁹⁸. L'astronomie en tant que partie de la géométrie est donc une discipline qui s'éloigne de la physique puisqu'elle ne nous renseigne pas sur les propriétés des corps matériels en mouvement, mais cherche plutôt à trouver des causes formelles (abstraites préalablement et traitées à l'intérieur de la géométrie) qui ne sont en aucun cas des caractéristiques essentielles aux corps en mouvement. L'astronomie se voit donc reléguée à une tâche instrumentale et calculatoire, différente de la physique céleste. On peut y chercher une certaine cohérence, mais sans plus ; et ultimement, en cas de conflit entre les deux, il suffira de s'en sortir en disant qu'il s'agit de deux disciplines différentes.

L'apport de Kepler sera ici de proposer que les proportions mathématiques sont des caractéristiques essentielles des corps en mouvement. Dans l'*Astronomia nova*, il y aura certes des principes physiques qualitatifs invoqués (par exemple, dans son rejet du *Soleil moyen*) car la physique ne se réduira pas à une simple recherche de cause formelle ; mais éventuellement, les « intelligences » des planètes devront « connaître » leur trajectoire qui, elle, sera compréhensible (par elles comme par notre âme) selon la géométrie, ce qui garantira que physique et description géométrique soient enfin reliées. Ultimement, l'astronomie deviendra mathématique par nature et une seule description géométrique correspondra à la « véritable » trajectoire des planètes.

Une physique mathématique

Deux éléments permettront à Kepler de remplir cette tâche : le recours au concept d'harmonie et l'importance des archétypes. Le premier élément sera élaboré assez tardivement, dans l'*Harmonice mundi* (1619) : il s'agira de comprendre les mouvements planétaires comme un chœur polyphonique où chaque planète déploie sa propre mélodie dans

¹⁹⁷ Je reprends ici la formulation de SIGGEN (2005), p. 142.

¹⁹⁸ *Idem.*

le temps (le son étant d'autant plus aigu que la vitesse est élevée), créant ainsi des proportions harmoniques (éventuellement reconstituables par la géométrie) que notre âme peut reconnaître¹⁹⁹. Cela permettra aux mathématiques d'être comprises comme une façon adéquate de remplir toutes les tâches de l'astronomie : les régularités mathématiques deviendront ainsi l'outil par excellence pour décrire et expliquer le mouvement des astres compris alors pleinement en tant que corps en mouvement. À ce moment de ses recherches, Kepler sera convaincu d'avoir enfin rempli ses tâches en tant qu'astronome. Cela dit, à l'époque de l'*Astronomia nova*, Kepler n'a pas encore achevé cette théorie, qui était évoquée dès le *Mysterium cosmographicum*. Ainsi, l'ellipse tout comme la loi des aires ne trouveront pas leur explication dans un cosmos musical ; Kepler mettra toutefois beaucoup d'efforts pour trouver une justification autre qu'une simple concordance avec les observations.

Le deuxième élément a déjà été abordé au premier chapitre de cette thèse. Nous avons vu que même si les archétypes n'étaient pas explicitement cités dans l'*Astronomia nova*, ils s'y retrouvaient certainement en arrière-plan²⁰⁰ en tant que garants d'une possible union entre mathématique et physique. En effet, le monde physique a été, selon Kepler, modelé à l'image des archétypes (géométriques à l'époque du *Mysterium cosmographicum*, harmoniques à partir de l'*Harmonice mundi*), ce qui permet aux mathématiques de nous donner les outils essentiels pour comprendre le monde matériel, soumis au changement et au mouvement. Comme le résume bien Martens : « Unlike the mathematical, the archetypal is not indifferent to physical change for the physical was created to mirror the archetypal. »²⁰¹ Ainsi, lorsque Kepler se demande comment l'intelligence d'une planète peut « connaître » sa trajectoire, on peut y voir certes une exigence qualitative – à savoir, que la planète puisse s'orienter autour d'un point contenant un corps physique – mais s'y trouve également une exigence quantitative, à savoir, que la planète suive une certaine régularité mathématique, cette dernière étant connaissable par son « intelligence » – et la nôtre par le fait même. Enfin, lorsque Kepler se mettra à chercher des analogies entre les proportions mathématiques observées dans le magnétisme (que nous verrons à la section 3.4) et les proportions observées dans les cieux, impossible de

¹⁹⁹ J'ai analysé ces arguments dans le troisième chapitre de mon mémoire. Cf. RIVERIN (2007), pp. 44-58.

²⁰⁰ Les archétypes sont d'ailleurs délibérément mis de côté par STEPHENSON (1987) dans sa lecture de l'*Astronomia nova*, alors que leur importance est constamment mise en lumière par MARTENS (2000). Je préfère cette deuxième approche, qui me semble plus juste quant aux réelles vues de Kepler. Nous avons vu au chapitre 1 les arguments supportant ce point de vue.

²⁰¹ MARTENS (2000), p. 109.

ne pas y voir la recherche de structures mathématiques récurrentes, ce qui nous ramène encore une fois aux modèles mathématiques de la création. Encore une fois, Kepler demeure relativement aristotélicien en ce que les causes formelles ne correspondent pas directement aux causes efficientes ; mais les archétypes font en sorte que les secondes reflètent les premières et donc, les proportions mathématiques sont les mêmes dans le monde naturel (physique) et dans le monde abstrait (mathématique). Les archétypes permettent donc de justifier une approche mixte en astronomie.

En fin de compte, Kepler ne sera satisfait que lorsqu'il aura trouvé les « véritables » proportions des cieux, soit les descriptions géométriques fondées sur les exigences de la physique (*a priori*), à la fois qualitatives et quantitatives, et compatibles avec les observations. Cela fait donc de la géométrie (et éventuellement, de l'harmonie) la clef pour comprendre véritablement le monde céleste. Cette intégration de la mathématique à la physique était un pas crucial pour effectuer la révolution astronomique. On a souvent mis cette valorisation des mathématiques sur le compte d'un héritage pythagoricien ; c'est ce dernier, et la critique que Kepler en fait, que nous allons maintenant étudier en détail.

3.2. L'introduction des mathématiques comme clef pour comprendre l'univers : l'influence des Pythagoriciens, de Platon et des Néo-Platoniciens

Si Kepler critique souvent Aristote, il ne craint pas de s'afficher explicitement comme un disciple de Platon et de Pythagore. C'est notamment le cas dans une célèbre lettre datée du 13 octobre 1597 qu'il a adressée à Galilée peu de temps après que ce dernier, suite à sa lecture du *Mysterium cosmographicum*, eut écrit à Kepler que même s'il partageait ses convictions coperniciennes, il n'allait pas exposer publiquement ces positions impopulaires. Déçu, Kepler lui répond qu'il aurait préféré que Galilée choisisse autre chose que de renoncer à combattre l'ignorance universelle et que « en cela, tu suives Platon et Pythagore, nos maîtres authentiques »²⁰². Il va de soi que Kepler, nettement en faveur de la diffusion du savoir et de la vérité, en aucun cas ne saurait souscrire à une tradition de l'initiation ou de l'enseignement ésotérique. Il ne craint toutefois pas d'affirmer que Platon et Pythagore sont leurs maîtres

²⁰² « qua in re Platonem et Pythagoram, nostros genuinos magistros, sequeris ». *Opera omnia*, I, p. 41 ; *Lettre à Galilée*, 13 octobre 1597 (ma traduction).

authentiques, et en cela il fait référence à bien plus que la source des cinq polyèdres platoniciens, soit « ces cinq corps réguliers qui, depuis Pythagore et Platon jusqu'à nos jours, ont acquis une si grande célébrité »²⁰³, sur lesquels s'appuie son système du *Mysterium cosmographicum*. Mais fidèle à son habitude, Kepler n'adoptera pas entièrement leurs visions du monde et va s'en inspirer tout en les critiquant.

L'apport des Pythagoriciens est nettement visible dans l'*Harmonice mundi*, où Kepler reprend les positions pythagoriciennes quant à l'harmonie du monde et les remanie avant de proposer sa propre conception de l'harmonie cosmique²⁰⁴. Nous ne reprendrons pas cette analyse mais nous retiendrons le fait qu'il est tout à fait juste de remarquer que l'utilisation des mathématiques par Kepler comme clef pour comprendre le monde est inspirée par une idée pythagoricienne, selon laquelle le monde est essentiellement mathématique. Nous avons vu, lorsque nous avons parlé des archétypes²⁰⁵, que Kepler fonde de façon théologique cette omniprésence des mathématiques, Dieu ayant pris les mathématiques comme modèle de la création. Néanmoins, il faut se garder de voir dans cette croyance en un monde gouverné par les mathématiques une simple mystique pythagoricienne réinterprétée de façon chrétienne et purement fondée sur la foi, voire dénuée de rationalité. Bien au contraire, comme le remarque le célèbre philosophe des sciences Karl Popper : « Kepler's beautiful Pythagorean dreams of the harmony of the world system did not invalidate the objectivity, the testability, the rationality of his three laws, nor the rationality of the problem which these laws posed for an explanatory theory. »²⁰⁶ J'irai plus loin en affirmant que non seulement l'inspiration pythagoricienne n'enlève rien au caractère rationnel des découvertes képlériennes, mais elle est même essentielle pour fonder une science physique, explicative et descriptive, trouvant ses réponses dans les mathématiques. Mais pour ce faire, Kepler aura besoin de critiquer cette approche qui, selon lui – et en cela il reprend exactement la critique d'Aristote – néglige le volet empirique afin de conserver une structure numérique préétablie et parfois fautive. On le voit par exemple lorsqu'il reproche aux Pythagoriciens d'avoir négligé, dans le cas des harmonies auditives, le témoignage sensible :

²⁰³ « illa quinque regularia corpora, inde a Pythagora et Platone ad nos usque celebratissima » *Opera omnia*, I, p. 106 ; *Le secret du monde*, Ancienne préface, trad. A. Segonds, p. 31.

²⁰⁴ J'ai analysé ce renouvellement de l'harmonie pythagoricienne dans le premier chapitre de mon mémoire de maîtrise. Cf. RIVERIN (2007), pp. 6-24.

²⁰⁵ Au chapitre 1 de cette thèse.

²⁰⁶ POPPER (1975), p. 84.

En effet, les Pythagoriciens s'adonnèrent à cette forme de philosophie par les nombres de sorte qu'ils ne se tinrent plus dorénavant au jugement des oreilles, des indications desquelles au début ils étaient parvenus à cette philosophie, mais ils déterminèrent à partir de leurs nombres seuls ce qui serait bien proportionné, mal proportionné, consonant, dissonant, en forçant l'instinct naturel de l'ouïe.²⁰⁷

Cette critique était déjà présentée dans le chapitre 12 du *Mysterium cosmographicum*, où Kepler affirme que lorsque vient le temps d'établir quels sont les intervalles consonants, « c'est l'oreille qui indique combien il se rencontre de sons ainsi définis »²⁰⁸ ; une fois ces consonances établies, ce sont les proportions mathématiques qui vont permettre d'expliquer véritablement pourquoi un intervalle nous semble charmant ou non à l'oreille – ce qui est ici en accord avec l'approche pythagoricienne. Kepler fera exactement le même reproche à Ptolémée, en lui attribuant d'abord un grand mérite puisque ce dernier « le premier, il y a mille cinq cents ans, soutint le sens de l'audition contre la Philosophie Pythagoricienne »²⁰⁹ en reconnaissant d'autres intervalles consonants que ceux qui étaient admis par les Pythagoriciens ; ce faisant « il restitua le jugement des oreilles dans sa dignité »²¹⁰ et fit prédominer le témoignage sensoriel, concret, sur son abstraction mathématique explicative. Néanmoins Ptolémée ne persista pas dans cette voie étant donné son penchant pythagoricien pour la « contemplation des nombres abstraits »²¹¹ et refusa, en dernier lieu, de reconnaître ces intervalles consonants comme de véritables consonances.

Comme le remarque avec justesse Kozhamthadam²¹², il faut donc se garder de voir en Kepler un mystique mathématique : il est évident que Kepler abhorre une pure contemplation des nombres, voire une divination de ces derniers. Néanmoins les proportions mathématiques n'en seront pas moins des caractéristiques essentielles de la nature – et non accidentelles, comme c'est le cas chez Aristote – mais encore faut-il bien comprendre de quelle façon et en vertu de quoi elles règnent dans le monde. Pour Kepler, les nombres eux-mêmes ne peuvent

²⁰⁷ « Huic enim philosophandi formae per numeros tantopere fuerunt dediti Pythagoraei, ut jam ne aurium quidem iudicio starent, quarum tamen indiciis ad philosophiam hanc initio perventum erat, sed quid concinnum esset, quid inconcinnum, quid consonum, quid dissonum, ex solis suis numeris definirent, vim facientes instinctui naturali auditus. » *Opera omnia*, V, p. 132 ; *Harmonice mundi*, III (ma traduction).

²⁰⁸ *Le secret du monde*, XII, trad. A. Segonds, p. 101.

²⁰⁹ « primus ante annos 1500 sensum auditus contra philosophiam Pythagoricam asseruit. » *Opera omnia*, V, p. 132 ; *Harmonice mundi*, III (ma traduction).

²¹⁰ « aurium iudicium suae dignitati restituit », *Opera omnia*, V, p. 133 ; *Harmonice mundi*, III (ma traduction).

²¹¹ « contemplationi numerorum abstractorum ». *Idem*.

²¹² KOZHAMTHADAM (1994), p. 58.

constituer en soi une explication acceptable au sein de la physique céleste puisqu'ils sont en nombre infini et ne peuvent pas rendre compte *a priori* de la constitution des cieux, à moins que nous ne choissions de vouer un culte arbitraire à un nombre en particulier (par exemple, 6 chez Zarlino, ou 4 pour les Pythagoriciens). Encore une fois, l'importance des questions cosmographiques *a priori* joue un rôle primordial dans le rejet d'une explication purement numérique, jugée arbitraire, donc non scientifique. On le voit dès la préface du *Mysterium cosmographicum* : « je ne pouvais faire de conjecture à partir de la noblesse d'aucun nombre afin d'expliquer pourquoi, au lieu d'un nombre infini, si peu de mobiles existent. »²¹³ Si un nombre en particulier semble gouverner le monde, ce sera non pas en tant qu'il est lui-même particulièrement noble mais bien en tant qu'il résulte d'une cause antérieure. Sur ce point, Kepler se distinguait nettement de ceux parmi ses contemporains qui cherchaient des explications mathématiques de la nature et qui s'en tenaient généralement à une simple recherche de rapports numériques. Dans une note importante écrite pour la réédition du *Mysterium cosmographicum*, Kepler reconnaît que le *senario*²¹⁴ semble bien gouverner le monde, mais il rompt avec la tradition en refusant de voir là une explication causale satisfaisante :

J'ai donc eu raison de répudier les qualités du sénaire / considéré en soi-même, pour ne pas les mettre au rang de cause du nombre six des cieux; j'ai donc eu raison de considérer que certaines causes évidentes devaient précéder, d'où résulterait spontanément le nombre six des cieux.²¹⁵

Ainsi, pour Kepler, si le *senario* a un rôle à jouer dans le monde, ce n'est qu'en tant que cause intermédiaire, subordonnée à d'autres principes qui, eux, ne peuvent se ramener aux qualités propres du nombre 6. Certes, Kepler reconnaît une certaine noblesse au nombre 6 en ce qu'il est le premier des nombres parfaits, c'est-à-dire qu'il est le plus petit nombre égal à la somme

²¹³ « Neque enim ab ullius numeri nobilitate conjectari poteram cur pro infinitis tam pauca mobilia extitissent. » *Opera omnia*, p. 107; *Le secret du monde*, Ancienne préface, trad. A. Segonds, p. 33.

²¹⁴ Le *senario* est un système harmonique élaboré par Gioseffo Zarlino (1517-1590) où l'on construit les intervalles non pas à partir des quatre (tel que prescrit par la tradition) mais plutôt des six premiers nombres entiers.

²¹⁵ « Recte igitur repudiavi senarii ipsius per se considerati dotes, ne adsciscerem illas inter causas senarii coelorum : recte censui, oportuisse praecedere causas aliquas, evidentes, ex quibus deinde senarius iste coelorum ultro resultaret. » *Opera omnia*, I, p. 111; *Le secret du monde*, Ancienne préface, note 7, trad. A. Segonds, pp. 40-41.

de ses diviseurs propres ($6 = 1+2+3$)²¹⁶. À l'époque de la réédition du *Mysterium cosmographicum*, Kepler a élaboré son système harmonique et cela lui donne un argument pour rejeter les nombres parfaits en tant que particulièrement dignes : en effet, puisque tous les autres nombres parfaits (28, 496, 8128, etc.) sont des multiples de nombres premiers – tel que montré par Euclide – et que le système harmonique képlérien repose sur les nombres premiers, il s'ensuit que tous les autres nombres parfaits sont absents de l'édifice explicatif, et donc que cette propriété n'a pas de pouvoir explicatif. Mais un autre argument est également présenté, lequel ne requiert pas l'élaboration du système harmonique ultérieurement développé par Kepler et qui permet de rejeter la perfection des nombres en tant que telle comme critère de dignité. Il s'agit d'affirmer que cette propriété est purement accidentelle :

Assurément **l'égalité est quelque chose de beau**, mais la présente égalité des nombres avec les nombres qui sont leurs parties est **purement accidentelle** [...]. [D]e même pouvons-nous dire, à présent, à propos des nombres qui en mesurent un autre : chacun de ces nombres mesure le nombre donné d'abord en lui-même et il ne reçoit pas cette propriété d'une quelconque égalité prétendue ; et c'est ensuite qu'il arrive, **par accident**, à tous ces nombres d'être égal, à eux tous, au nombre mesuré.²¹⁷

La beauté seule d'une propriété n'est donc pas une condition suffisante pour conférer au nombre qui la possède un statut particulier (perfection ou autre) si cette propriété n'est pas essentielle ou, pour le dire autrement, si cette propriété ne fait pas partie intégrante de la nature du nombre. Dans le cas qui nous préoccupe ici, l'égalité entre les uns et l'autre n'est pas ce qui permet aux diviseurs d'un nombre de surgir. Par exemple, si 1, 2 et 3 peuvent diviser le nombre 6, c'est parce qu'ils sont mis en rapport individuellement avec le 6 ; l'égalité avec leur somme ($1+2+3=6$) ne se constate qu'après coup, en second lieu, sans qu'elle n'ait joué un rôle dans l'attribution des diviseurs. Ce qui fait écrire à Kepler : « Par conséquent, cette égalité ne

²¹⁶ Perfection du nombre telle que définie par Euclide dans ses *Éléments*, VII, 22 : « Perfectus numerus est, qui suis ipsius partibus est aequalis. » Cf. EUCLIDE (1969). Les trois nombres parfaits suivants sont 28 ($=1+2+4+7+14$), 496 et 8128. Notons qu'à l'époque de Kepler, plusieurs autres occurrences du nombre 6 étaient relevées et lui conféraient un statut particulier : 6 planètes, 6 directions, 6 surfaces du cube, 6 jours de création, etc.

²¹⁷ « **Est quidem aequalitus pulchrum quippiam**, sed haec aequalitas numeris ipsis, ratione sui ipsorum singulorum est **accidentaria** [...]. [S]ic nunc etiam de numeris emetientibus unum aliquem dicere possumus : quod scilicet prius quilibet illorum pro se ipso emetiatur propositum numerum, non accipiens hanc naturam ab aequalitate praetensa, sed postea demum **accidat** illis singulis, ut universi aequent mensuratum. » *Opera omnia*, I, p. 111; *Le secret du monde*, Ancienne préface, note 7, trad. A. Segonds, p. 40. Je souligne.

confère aux nombres rien de plus en matière de puissance ou de pertinence qu'à un paysan la découverte d'un trésor. »²¹⁸ Si les mathématiques peuvent nous aider à répondre aux questions de la physique, de façon *a priori*, il n'en est pas moins hors de question de s'en tenir aux propriétés des nombres, comme le ferait un Pythagoricien vouant un culte à ces derniers, puisqu'elles ne sont pas pertinentes à cette recherche. Où chercher alors la source de ces propriétés arithmétiques ? Dans le cas des nombres parfaits, Kepler nous explique – toujours dans cette même note – que l'égalité « résulte, **par nécessité géométrique**, de nombres déjà constitués »²¹⁹, c'est-à-dire de nombres nombrés, lesquels s'opposent aux nombres nombrants, rejetés par Kepler²²⁰. En d'autres mots, pour Kepler, le nombre n'existe qu'une fois présent dans quelque chose de comptable ; en tant qu'entité purement abstraite, au moyen de laquelle nous pouvons compter, il n'a aucun pouvoir ni efficacité²²¹. Or ce qui permet aux nombres de surgir est à rechercher au sein de la géométrie : en ce sens, Kepler critique l'approche pythagoricienne en affirmant la primauté de la géométrie sur l'arithmétique.

Nous avons vu le succès de cette approche dans le premier chapitre de cette thèse, lors de la présentation du modèle fondé sur les cinq polyèdres réguliers : c'était parce que seuls cinq solides parfaits pouvaient être construits géométriquement qu'il y avait cinq orbites et donc que les planètes étaient au nombre de six, et non pas parce que le nombre six (ou le cinq) avait une dignité particulière. Kepler notait d'ailleurs, dès sa préface, l'insuccès d'une recherche purement arithmétique – et par le fait même, discrète – des régularités pouvant expliquer la disposition précise des orbites²²². Mais outre la concordance empirique, qui aurait pu être purement accidentelle, nous voyons ici que tout cela s'inscrit dans un édifice théorique solidement argumenté. Car si les archétypes ayant servi de modèle lors de la création du monde sont géométriques, et non arithmétiques, ce n'est pas simplement parce que la géométrie permet facilement de rendre compte des données observationnelles : la physique trouvera ses réponses dans la géométrie (continue) et non dans l'arithmétique (discrète) en

²¹⁸ « Non plus igitur virtutis et dexteritatis confert numeris haec aequalitas, quam agricolae inventio thesauri [...] ». » *Idem*.

²¹⁹ « resultat **necessitate geometrica** ex jam constitutis ». *Idem*. Je souligne.

²²⁰ Comme il l'exprime dans la note précédente : « Et voilà que je rejette les “nombres nombrants”, comme on dit. » « En jam tunc rejectos a me numeros numerantes, ut appellat. » *Opera omnia*, I, p. 110 ; *Le secret du monde*, Ancienne préface, note 6, trad. A. Segonds, p. 40.

²²¹ Pour plus de détails sur cette distinction, qui remonte notamment jusqu'à Platon, voir la note 29 de A. Segonds dans KEPLER ([1596/1621] 1984), pp. 216-217.

²²² Cf. *Le secret du monde*, Préface, p.32.

vertu de la continuité de son objet. Autrement dit, il faut bâtir un système (*explanans*) géométrique plutôt qu'arithmétique, en vertu de la continuité de l'espace dans lequel les phénomènes (*explananda*) ont lieu.

Cet argument est clairement énoncé plus tard dans l'*Harmonice mundi*, où les causes des consonances (auditives) sont recherchées à l'intérieur de la géométrie, de façon à ce qu'elles fixent des limites claires aux consonances, tout en étant en accord avec la continuité de leur objet :

En effet, puisque les limites des intervalles consonants sont des quantités continues, il faut aussi que leurs causes, qui les séparent des dissonants, soient recherchées parmi la famille des quantités continues, non parmi les nombres abstraits, comme quantité discrète.²²³

Dans cet extrait, Kepler traite des recherches permettant de rendre compte des consonances auditives, perçues par l'oreille lorsque l'on fait vibrer une corde (ligne continue) selon des proportions bien précises ; mais l'argument tient parfaitement la route pour les régularités visuelles, perçues par l'œil – Kepler fera d'ailleurs lui-même la correspondance. Éventuellement, Kepler concevra que le monde est façonné non pas selon des « archétypes géométriques » mais selon des « archétypes harmoniques », en insistant sur le fait que ces derniers ont l'avantage de rendre compte du caractère dynamique, non statique, du monde – les harmonies trouvant toutefois leurs principes explicatifs dans la géométrie. Pour notre étude de l'*Astronomia nova*, il sera suffisant de parler d'archétypes géométriques, et de retenir que pour Kepler, la physique céleste trouvera ses réponses dans la géométrie et non l'arithmétique.

Nous pourrions évidemment voir dans cette primauté accordée à la géométrie une influence directe des *Elementa* d'Euclide – et nous reviendrons sur cette source importante²²⁴. Il est vrai que pour un mathématicien formé selon les principes euclidiens et maîtrisant ces derniers, il était tentant d'utiliser ces outils pour comprendre le monde ; mais au-delà de la disponibilité des outils mathématiques, il faut chercher ailleurs l'inspiration selon laquelle la nature est, par essence, géométrique. Cette prédominance de la géométrie sur l'arithmétique n'est pas sans nous rappeler les propos de Platon, notamment ce fameux adage que lui attribue

²²³ « Cum enim intervallorum consonorum termini sint quantitates continuæ, causas quoque, quæ illa segregant a dissonis, oportet ex familia peti continuarum quantitatum, non ex numeris abstractis, ut quantitate discreta [...]. » *Opera omnia*, V, p. 133 ; *Harmonice mundi*, III (ma traduction).

²²⁴ À la section 3.3 de cette thèse.

Plutarque : « Dieu géométrise toujours » (< *Aei ho theòs geômetreî* >). Plus généralement, le fait qu'il puisse exister une Idée du monde, séparée de ce dernier, relève évidemment d'un idéalisme platonicien : « C'est cette image, cette Idée, qu'il a voulu imprimer dans le monde, afin qu'il fût créé le meilleur et le plus beau [...]. »²²⁵ Cette préexistence de l'Idée (mathématique selon Kepler) sur le monde matériel est essentielle pour permettre à l'astronome de justifier le fait que l'on puisse extraire une forme mathématique, permanente, pouvant expliquer les mouvements des cieux. Quant à la primauté de l'Idée sur le monde, elle est nécessaire chez Kepler pour justifier que la saisie de l'Idée du monde soit suffisante pour répondre aux questions relatives à la physique, la nature ayant été modelée selon cette Idée.

Plus précisément, Kepler ne craint pas de faire référence explicitement au *Timée* de Platon ; l'influence de ce dernier est souvent palpable, notamment lorsque Kepler conçoit un monde créé par Dieu à son image, donc selon des proportions mathématiques, comme le Démonstrateur platonicien qui modèle le cosmos de façon géométrique. De même, les cinq solides réguliers (dits « platoniciens ») utilisés par Kepler pour son modèle du *Mysterium cosmographicum* sont les mêmes polyèdres que ceux du *Timée*. Néanmoins, Kepler se distingue nettement de Platon quant à cette conception géométrique du monde. Deux principales différences sont notamment relevées par J. V. Field²²⁶ : 1) contrairement à Platon, Kepler n'applique pas à la matière les cinq polyèdres réguliers convexes (associés aux cinq éléments par Platon), et ce en aucun endroit de son œuvre, incluant son ouvrage *Strena sive de Nive sexangula* (1611), où il traite de la symétrie des flocons de neige ; 2) contrairement à Platon, Kepler ne se contente pas d'une vague description métaphysique du cosmos, ni de propriétés non quantifiables de la matière, mais propose un modèle mathématique testable et mesurable. La première différence nous montre la grande originalité déployée dans le *Mysterium cosmographicum* quant à l'application de la géométrie, via les cinq solides platoniciens, pour rendre compte de la constitution des cieux. La seconde différence est l'une des raisons pour lesquelles plusieurs commentateurs ont cru que le principal apport de Kepler était d'avoir construit une astrophysique fondée sur des observations quantifiables et

²²⁵ « Hanc imaginem, hanc ideam mundi imprimere voluit, ut is fieret optimus atque pulcherrimus [...]. » *Opera omnia*, I, p. 123 ; *Le secret du monde*, II, trad. A. Segonds, p. 64.

²²⁶ FIELD (1988), p. 16.

mesurables²²⁷. Nous voyons maintenant que cela n'était possible que si l'on concevait, *a priori*, que les cieux étaient construits selon les règles de la géométrie, ce qui est d'inspiration platonicienne. Cette réhabilitation des mathématiques pour répondre aux questions de la physique a été, selon Koyré, le point tournant de la révolution scientifique, cette dernière étant interprétée par lui comme étant essentiellement une victoire de Platon (allié à l'atomisme démocritéen, que Kepler n'a toutefois pas adopté) : « En effet si, comme je l'ai dit jadis, **la science moderne est une revanche de Platon**, cette revanche victorieuse, Platon ne l'a pas remportée tout seul. C'est une alliance [...] de Platon avec Démocrite qui a **renversé l'empire d'Aristote** [...]»²²⁸. S'il est vrai que nous avons bel et bien affaire ici à un retour de la géométrisation platonicienne, qui était en conflit avec l'aristotélisme de l'époque, je crois qu'il faut toutefois nuancer cette affirmation en y voyant plutôt une sorte de sursomption, ou *Aufhebung* hégélienne, de ces deux conceptions proposant une nouvelle science où les propriétés essentielles des objets sont géométriques, faisant de ces dernières ce qu'il faut rechercher au sein de la physique.

Une troisième différence entre les conceptions képlérienne et platonicienne de la science astronomique me semble importante ici et elle concerne la valeur accordée au monde sensible : alors qu'il n'est qu'une pâle copie du monde des Idées chez Platon, pour qui la science doit porter directement sur les formes intelligibles, chez Kepler le monde sensible a un statut beaucoup plus noble. Cette particularité peut sembler étrange, voire paradoxale en regard de l'idéalisme platonicien que nous avons relevé plus haut. Comme le remarque Kozhamthadam : « No traditional kind of Platonism, Kepler's brand is a strange, "unnatural" mixture of realism and idealism : realist Platonism. »²²⁹ L'expression « réalisme platonicien » est ici détournée de son sens habituel : Kozhamthadam ne réfère pas ici à la doctrine prônant la réalité des Idées platoniciennes, mais bien d'une doctrine où la réalité du monde des Idées n'enlève rien au fait que le monde sensible existe également²³⁰ et que, par extension, nos sens puissent nous renseigner adéquatement sur le monde externe. Cette position peut

²²⁷ Rappelons que le *Timée*, malgré les intentions de son auteur de vérifier les axiomes selon une méthode hypothético-déductive, n'accorde qu'une mince place à la vérification empirique. Cf. PLATON (1950).

²²⁸ KOYRÉ (1973b), p. 321. Je souligne.

²²⁹ KOZHAMTHADAM (1994), p. 54.

²³⁰ Selon ses propres mots : « The principle of realism was one of the fundamental principles to which Kepler subscribed. It holds that the world of our experience is real, not the figment of our imagination. Nor is the world any less real than the Platonic world of Ideas. » KOZHAMTHADAM (1994), p. 52.

effectivement sembler paradoxale : difficile de proposer à la fois la primauté des Idées (séparées) et la pertinence des données sensibles pour l'élaboration d'une science. Nous avons vu toutefois que Kepler juxtapose constamment les approches *a priori* et *a posteriori* (cette dernière étant mise en valeur dans l'*Astronomia nova*) et plutôt qu'un paradoxe, nous pourrions plutôt y voir une volonté de faire concorder ces deux voies, chacune étant insuffisante en soi.

Cela n'est pas sans lien avec ses exigences élevées quant au but poursuivi par les praticiens de l'astronomie : tel que vu plus haut – et c'est là une autre différence majeure relevée par Kozhamthadam²³¹ – la conception instrumentaliste de l'astronomie remonterait à Platon, pour qui cette science devait viser à « sauver les phénomènes ». Or pour Kepler, tel que vu au chapitre précédent, l'astronomie peut décrire et expliquer le monde tel qu'il est – c'est là le « réalisme » au sens traditionnel du terme, position que Kozhamthadam dit être influencée par le principe du réalisme, soit le principe qui pose l'existence du monde sensible tel qu'il nous apparaît. Cette forme de réalisme épistémologique est possible chez Kepler parce qu'il croit que l'astronomie peut être fondée dans la physique, et que cette dernière repose sur des raisons *a priori* ; les causes véritables des phénomènes peuvent donc être connues. Néanmoins, comment savoir *a priori* que le monde sensible existe vraiment et que les phénomènes peuvent nous donner un sérieux indice pour valider ou non une hypothèse astronomique?

Les sources de cette croyance relèvent, selon Kozhamthadam, de trois principales influences, soit celle de Copernic, celle de Tycho Brahe, et celle de ses idées religieuses. Nous avons abordé au chapitre précédent les deux premières influences ; quant à la troisième, Kozhamthadam relève justement ceci : « he [*sc.* Kepler] considered God most real ; the universe reflects God, and so it also must be real »²³². Certainement, cette idée d'un monde sensible réel reflétant son créateur divin relève d'un présupposé religieux. Je crois toutefois que c'est du côté du néo-platonisme que nous pouvons y trouver sa source, en particulier celui de Proclus de Lycie.

²³¹ KOZHAMTHADAM (1994), p. 54.

²³² KOZHAMTHADAM (1994), p. 55.

Proclus est un auteur particulièrement admiré par Kepler, qui lui fait explicitement référence à de nombreuses reprises, surtout dans son *Harmonice mundi*. La fameuse doctrine néo-platonicienne de l'émanation lui est utile pour appuyer l'idée selon laquelle les mathématiques peuvent nous révéler la structure du monde : tout comme l'Un, principe transcendant, se reflète dans les différents niveaux hiérarchiques de la réalité, ainsi Dieu imprime son image dans notre âme et dans le monde physique ; par conséquent, les structures mathématiques dans notre âme se retrouvent également dans le monde et peuvent nous aider à comprendre ce dernier. La page titre du livre I de l'*Harmonice mundi* débute d'ailleurs avec cet extrait des *Commentaires sur le livre I des Éléments d'Euclide* de Proclus :

(Les mathématiques) contribuent pour de grandes choses à l'étude de la nature, révélant **la nature bien ordonnée de la raison, selon laquelle le tout a été construit...** et montrant que les éléments simples et primitifs, par lesquels la totalité du ciel fut complétée, ayant pris les formes appropriées parmi ses parties, sont connectés ensemble **avec symétrie et égalité**.²³³

Encore une fois, la nature est ici conçue comme étant créée selon les mêmes règles mathématiques qui régissent notre esprit. Il est donc garanti que le monde sensible, bien qu'inférieur aux mondes spirituel et divin, contienne en lui tous les indices pour que son mystère soit percé puisqu'il comporte la même structure que ses mondes supérieurs, à savoir, une structure mathématique (géométrique). Nous avons vu plus haut que la croyance en un Dieu créateur était une prémisse nécessaire, chez Kepler, pour justifier une connaissance mathématique du monde ; nous voyons maintenant que ces croyances issues du christianisme peuvent être comprises comme une réinterprétation chrétienne du néo-platonisme.

Cette idée d'un monde sensible comme fidèle copie du divin reprend aussi l'essentiel d'une théorie s'inscrivant en continuité avec la doctrine néoplatonicienne de l'émanation : la théorie de la *signatura rerum*, développée au Moyen Âge notamment par Agrippa de Nettesheim (1486-1535) ainsi que Paracelse (1493-1541) et ses disciples²³⁴. Selon cette

²³³ *Opera omnia*, V, p. 80 ; *Harmonice mundi*, I. Le texte de ce passage est reproduit en grec par Kepler. Je l'ai traduit ici en m'aidant aussi de la traduction anglaise dans MARTENS (2000), p.35, qui me semble assez juste. Je souligne.

²³⁴ Cf. PAULI ([1952] 2002), p. 41.

théorie, les choses ont une signification cachée, et nous pouvons percer leur secret en y saisissant les indices d'une autre réalité cachée, invisible. Le physicien Wolfgang Pauli, dans son bref mais éclairant texte²³⁵ portant sur les archétypes képlériens, pointe un extrait du *Tertius interveniens* (1610)²³⁶ fort pertinent, relevant directement de cette doctrine. Non seulement le titre de la section est expressément « Discours philosophique *de signaturis rerum* », mais son contenu exprime aussi cette idée d'un monde sensible reflétant adéquatement son créateur. Je retranscris ici une version tronquée de cet extrait :

« De même que les corps célestes (les planètes) sont marqués et reproduits dans les corps géométriques et inversement, de même les mouvements circulaires qui s'y produisent entendent renvoyer aux plans géométriques inscrits dans le cercle. [...] Oui ! La très sainte Trinité est figurée dans une sphère creuse et **c'est la même chose dans le monde**, et la première personne, source de divinité, est au centre, et ce centre est figuré dans le Soleil, qui est au centre de l'univers, puis donc lui aussi est une source d'où jaillissent toute lumière, tout mouvement et toute vie dans le monde. [...] Or, comme le créateur a joué, de même fit-il que **la nature, son image fidèle**, apprenne à jouer, et joue le jeu même qu'il lui avait montré. »²³⁷

Dans cet extrait, on voit clairement que Kepler conçoit le monde physique comme étant analogue au monde divin. La nature n'est certes qu'une copie du monde divin, mais elle n'en demeure pas moins une « image fidèle » de celui-ci ; même chose pour les corps célestes, analogues aux corps géométriques, ainsi que pour leurs mouvements. Il y a analogie de structure, et celle-ci n'est autre que géométrique ; les structures mathématiques sont donc bel et bien présentes dans le monde, qui a appris à « jouer » (< *spielen* >) de la même façon que son créateur et à l'intérieur duquel nous pouvons retracer ce jeu. Cet extrait est également une bonne illustration de la doctrine de l'émanation en ce que le Soleil, à l'image de Dieu et tel l'Un, est le principe ultime de toute chose et transmet son mouvement à toute la nature²³⁸.

L'idée selon laquelle le monde est – géométriquement – à l'image de son Créateur est toutefois présente dès le *Mysterium cosmographicum*, alors que Kepler propose un lien

²³⁵ Cf. PAULI ([1952] 2002).

²³⁶ Ce texte, écrit en allemand, est l'un des trois traités que Kepler a consacrés à l'astrologie.

²³⁷ *Opera omnia*, I, pp. 639-640 ; *Tertius interveniens*, 126, trad. M. Carlier, dans PAULI ([1952] 2002), p. 56. Je souligne.

²³⁸ Nous verrons l'importance de ce présupposé pour la découverte de la seconde loi dans le prochain chapitre.

d'analogie entre les deux en se référant à un autre penseur, tiré de la tradition mystique : le philosophe et théologien Nicolas de Cues (1401-1464)²³⁹. Dans le deuxième chapitre de l'ouvrage, Kepler commence par lui attribuer la comparaison entre Dieu et le courbe, ainsi qu'entre la Création et le droit²⁴⁰, comparaison pour laquelle « le Cusain et d'autres philosophes [lui] semblent tout simplement divins »²⁴¹. L'astronome récupère ensuite cette analogie : *via* le rapport du courbe et du droit, qui sont incommensurables, elle « exprime ce qui à la fois lie et sépare le Créateur et sa Création »²⁴², pour reprendre les mots du commentateur Gérard Simon. Le droit est constitutif des différents corps qui composent le monde (comme les cinq polyèdres qui dictent les distances des planètes au Soleil), mais c'est bien la « noblesse du courbe » (< *curvi nobilitas* >)²⁴³ qui exprime la perfection du créateur (comme en témoigne la sphéricité du monde et des sphères).

Nous avons vu, lors de notre analyse du *Mysterium cosmographicum*²⁴⁴, comment se présente cette analogie entre la sphère du monde et la trinité divine. Je suis d'accord avec Simon lorsqu'il remarque que cette analogie « serait purement anecdotique si elle n'avait joué [...] un rôle heuristique capital »²⁴⁵. Par exemple, elle permet de suggérer qu'une certaine force pourrait émaner de Dieu et se propager à travers le monde, via l'Esprit Saint, sorte de souffle remplissant la sphère : ces considérations seront primordiales dans les recherches ultérieures de l'*Astronomia nova* (1609), qui s'intéresseront au rôle causal du Soleil eu égard aux mouvements planétaires. Mais aussi, elle apporte une autre certitude que le monde soit géométrique.

Un autre apport important de Proclus pour la conception képlérienne d'une connaissance mathématique de la nature est présenté explicitement alors qu'il se réclame de ce Néo-platonicien dans sa reprise de la théorie de la réminiscence :

Car reconnaître, c'est comparer une perception sensible extérieure avec des idées intérieures, et les juger concordantes. Ce que Proclus exprime à merveille par le mot

²³⁹ Pour les textes de référence de Nicolas de Cues, voir la note 3 de A. Segonds dans KEPLER ([1596/1621] 1984), p. 233.

²⁴⁰ Cf. *Le secret du monde*, II, p. 63.

²⁴¹ « divinus mihi Cusanus aliique videntur [...] » *Opera omnia*, I, p. 122 ; *Le secret du monde*, II, trad. A. Segonds, p. 63.

²⁴² SIMON (1979), p. 134.

²⁴³ *Le secret du monde*, II, p. 64.

²⁴⁴ À la section 1.3 de cette thèse.

²⁴⁵ SIMON (1996), p. 91.

« éveiller », comme d'un sommeil. En effet, de même que les choses sensibles que nous rencontrons au-dehors nous rappellent le souvenir de celles que nous connaissions auparavant, de même les choses mathématiques sensibles, si elles sont reconnues, excitent les intellectuelles qui étaient présentes avant à l'intérieur, si bien que, désormais, elles resplendent en acte dans l'âme où elles étaient auparavant comme cachées sous le voile de la puissance.²⁴⁶

Cet extrait relève d'une théorie de la connaissance que nous pouvons reconstruire à partir de ses écrits et qui s'articule notamment autour de la notion d'harmonie²⁴⁷. Cette théorie innéiste est en fait une reprise néoplatonicienne du dualisme platonicien : nous avons dans notre esprit les réalités mathématiques, lesquelles, bien qu'étant en lien avec le monde sensible (modelé selon ces dernières), ne sont en rien d'origine sensible. À ceux qui, comme Aristote, objecteraient que les êtres mathématiques sont plutôt abstraits directement à partir des choses, Kepler répond en se réclamant explicitement de Proclus :

On se demande sans doute comment il peut exister une science d'une chose que l'esprit n'a jamais apprise et peut-être est incapable d'apprendre, s'il est privé de sensibilité aux choses extérieures. C'est ce à quoi répond Proclus ci-dessus, dans la terminologie usuelle de sa philosophie : quant à nous aujourd'hui, nous emploierions si je ne m'abuse à très juste titre le vocable d'instinct. Car l'esprit humain, comme toutes les autres âmes, connaît par instinct la quantité, même s'il est privé de toute sensibilité à cette fin : car par lui-même il conçoit la ligne droite, ainsi qu'un intervalle constant à partir d'un point, et donc par lui-même il imagine le cercle. S'il en est ainsi, il peut *a fortiori* trouver en celui-ci une démonstration, et par conséquent remplir l'office de l'oeil dans la considération d'une figure [...].²⁴⁸

²⁴⁶ « Nam agnoscere est, externum sensile cum ideis internis conferre eisque congruum judicare. Quod pulchre exprimit Proclus vocabulo suscitandi, velut e somno. Sicut enim sensilia foris occurrentia faciunt nos recordari eorum, quae antea cognoveramus, sic mathemata sensilia, si agnoscuntur, eliciunt igitur intellectualia ante intus praesentia, ut nunc actu reluceant in anima, quae prius veluti sub velo potentiae latebant in ea. » *Opera omnia*, V, p. 224; *L'harmonie du monde*, IV, trad. M. Carlier (traduction modifiée), dans PAULI ([1952] 2002), p. 45.

²⁴⁷ J'ai procédé à cette reconstruction dans le quatrième chapitre (intitulé « L'harmonie comme activité de l'âme ») de mon mémoire de maîtrise, dont l'objet rendait cette analyse essentielle. Cf. RIVERIN (2007), pp. 59-70. Or comme la notion d'harmonie n'est pas directement touchée par les propos de l'*Astronomia nova*, je ne vais pas reprendre cette analyse ici. Je me contente de pointer les éléments néoplatoniciens ayant permis à Kepler de concevoir sa nouvelle astronomie mathématique.

²⁴⁸ « Quaeras, qui possit inesse scientia rei, quam nunquam mens didicit nec fortasse discere potest, si sensu rerum externarum destituatur? Ad hoc respondit supra Proclus, verbis in sua philosophia tritis; nos hodie, ni fallor, vocabulo instinctus rectissime utemur. Menti quippe humanae ceterisque animis ex instinctu nota est quantitas, etiamsi ad hoc omni sensu destituatur; illa se ipsa lineam rectam, ipsa intervallum aequale ab uno

L'esprit peut donc, par lui-même, connaître les réalités mathématiques, en vertu d'un instinct naturel ; et s'il intellige une chose de façon mathématique, c'est qu'il a reconnu en elle une beauté parfaite, celle d'une Idée archétypale innée²⁴⁹.

Si Kepler reprend plusieurs idées néoplatoniciennes, il n'embrasse pas ce mouvement sans aucune critique, bien au contraire. Pourtant, la plupart des premiers historiens s'étant penchés sur l'astronomie et la révolution scientifique ont vu en Kepler un mystique dont les penchants néoplatoniciens, jugés irrationnels, freinaient sa rigueur ou étaient du moins en conflit avec cette dernière²⁵⁰. La tendance s'est renversée depuis lors et de nombreuses études tendent plutôt à montrer, au contraire, le rôle important de ces fondements pour l'élaboration de la nouvelle science d'une part, et la volonté képlérienne de s'affranchir des explications non rationnelles d'autre part. C'est notamment sur cette volonté que le philosophe de la physique Sakellariou met l'accent alors qu'il propose une nouvelle interprétation de l'évolution de la science de Kepler à Newton : « Kepler is the hero par excellence in the process of breaking with deeply ingrained mystical approaches [...] »²⁵¹ Pour voir à quel point Kepler avait en horreur que l'astronomie soit réduite à une mystique irrationnelle, il suffit de se pencher sur la controverse de Kepler et de l'alchimiste rosicrucien Robert Fludd (1574-1637), dont le premier épisode se trouve à la toute fin de l'*Harmonice mundi*, dans un appendice au livre V²⁵².

puncto intelligit, ipsa per haec sibi circulum imaginatur. Si hoc, potest multo magis in eo demonstrationem invenire itaque oculi officium in adspiciendo diagrammate [...] supplere. » *Opera omnia*, V, p. 222; *L'harmonie du monde*, IV, trad. G. Simon, dans SIMON (1979) p. 140 (traduction modifiée).

²⁴⁹ Dans l'*Harmonice mundi*, Kepler élabore un système où l'âme réalise pleinement l'harmonie du monde au moment où elle reconnaît les proportions archétypales correspondant aux harmonies sensibles. Encore une fois, précisons que ces détails se retrouvent dans mon mémoire et qu'ils ne seront pas reproduits ici. Notons d'ailleurs qu'à l'époque de l'*Astronomia nova*, Kepler n'avait pas encore complété ses recherches harmoniques ni explicité sa conception harmonique de la connaissance. Il est toutefois indubitable que ces penchants néoplatoniciens sont présents depuis les tout débuts de ses recherches et qu'ils ont joué un rôle pour la conception de sa nouvelle astronomie.

²⁵⁰ Comme le remarquent BARKER et GOLDSTEIN (2001), p. 99 : « Twentieth-century historians have usually been happy to endorse Kepler's defense of Copernicus, although his reasoning is often dismissed as mystical. » Les auteurs retracent ensuite (p. 100, note 36) plusieurs passages illustrant cette dévalorisation du caractère raisonnable des recherches képlériennes étant donné ses conceptions mystiques jugées « curieuses » ou « fantaisistes ».

²⁵¹ SAKELLARIOU (2011), p. 113.

²⁵² Une excellente analyse de l'ensemble de cette controverse se retrouve dans PAULI ([1952] 2002), pp. 79-105 ; d'autres, plus brèves, sont présentées dans YATES ([1964] 1971), pp. 440-444 et dans CASPAR ([1959] 1993), pp. 290-293.

Dans cet appendice, Kepler s'en prend au livre de Fludd intitulé *Utriusque Cosmi Maioris scilicet Minoris Metaphysica, Physica atque technica Historia*²⁵³, livre proposant un système – inspiré par la tradition hermétique²⁵⁴ – où macrocosme et microcosme se reflètent l'un l'autre au sein de l'univers, univers dont le secret peut être tiré par celui qui, initié correctement aux mystères alchimiques, sait manipuler la matière et en tirer l'âme du monde. Plusieurs idées de cet ouvrage ne sont pas sans lien avec l'*Harmonice mundi* de Kepler, notamment celle illustrée dans la célèbre figure intitulée *Monochordus mundanus*²⁵⁵, où l'Univers se présente sous la forme d'un gigantesque monocorde vibrant harmonieusement selon des proportions mathématiques bien précises. Une autre idée reliée aux idées de Kepler se voit formulée en-dessous d'une autre illustration, représentant les pyramides divine et terrestre cette fois-ci. Fludd y exprime l'idée, vue plus haut, selon laquelle le monde est à l'image de son créateur, la faisant remonter à l'auteur mythique Hermès : « Mais puisque Hermès Trismégiste nomme **le monde l'image de Dieu même**, nous disons que l'on aperçoit l'image et la représentation de Dieu dans l'esprit du monde, comme la figure humaine se voit dans un miroir. »²⁵⁶ Malgré les affinités apparentes entre ces deux conceptions, Kepler critique violemment Fludd, qu'il accuse d'être beaucoup trop obscur et d'omettre d'utiliser les mathématiques pour rendre compte du monde. Il écrit par exemple :

Tu vois celui-là [sc. Fludd] être charmé par les ténèbres énigmatiques de ces très nombreuses choses, tandis que moi, je fais luire au yeux du public ces mêmes choses tombées de l'obscurité, dans la lumière de l'intelligence. Cela est certes familier aux chimistes, aux hermétiques, aux Paracelsiens ; les mathématiciens ont ce dernier but en propre.²⁵⁷

Et même si, comme le reconnaît Kepler, Fludd emploie à juste titre des proportions mathématiques pour rendre compte de l'harmonie du monde, il y manque le caractère démonstratif. Ainsi se termine cet appendice :

²⁵³ Oppenheim, 1621.

²⁵⁴ Notons que la tradition hermétique, dont les premières sources remontent au III^{ème} siècle av. J.-C., a repris plusieurs idées néoplatoniciennes.

²⁵⁵ Cette figure se retrouve dans l'ouvrage de FLUDD (1621), p. 90.

²⁵⁶ « At vero quatenus Trismegistus appellavit **mundum ipsius Dei imaginem**, eatenus ipsius Dei imaginem et simulacrum in mundi spiritu, tamquam effigiem humanam in speculo conspici dicimus. » FLUDD (1621), p. 21. J'ai repris ici la traduction de ce passage fournie par M. Carlier, dans PAULI ([1952] 2002), p. 81. Je souligne.

²⁵⁷ « Videas etiam, ipsum plurimum delectari rerum aenigmatibus tenebrosis, cum ego res ipsas obscuritate involutas in lucem intellectus proferre nitar. Illud quidem familiare est chymicis, hermeticis, Paracelsistis, hoc proprium habent mathematici. » *Opera omnia*, V, p. 332 ; *Harmonice mundi*, Appendice (ma traduction).

Je crois que ces quelques mots établissent que, même si la connaissance des proportions harmoniques est tout à fait nécessaire pour comprendre les mystères tout emplis d'une profondissime philosophie que nous livre Robert [Fludd], ce dernier, qui paraît avoir appris par cœur mon livre tout entier, n'approchera pourtant guère plus de ces mystères extrêmement complexes que ces proportions mêmes ne le font de la très exacte certitude des démonstrations mathématiques.²⁵⁸

Cela met en valeur un point important du caractère mathématique du monde selon Kepler : la nécessité de la démonstration. Car il ne suffit pas de reconnaître des proportions (*a posteriori*) ou d'affirmer simplement que le monde est mathématique : il faut y inclure les démonstrations propres à cette discipline (*a priori*)²⁵⁹.

Cette exigence de certitude des démonstrations mathématiques, Kepler en reparle dans sa seconde – et dernière – intervention dans sa querelle avec l'alchimiste :

Moi je t'avoue, mon Robert [Fludd], alors que l'on a affaire avec la certitude de la compréhension des choses, que ce n'est pas entièrement par *mon opinion* que je suis soulevé, mais par celles **communes à tous les mathématiciens** ; quand toi tu traites n'importe quelles choses mathématiques de façon bêtement hermétique, soit plus strictes soit plus relâchées, j'ai du mépris, et je ne déteste pas ce qui est parmi les choses elles-mêmes hermétiques ou mystérieuses de nature, mais à cause de cela même, parce que j'ai appris à ne jamais prendre les choses mathématiques si ce n'est **par des démonstrations mathématiques**, et à ne jamais *regarder l'intérieur très obscur de ton Hermès par des yeux mathématiques*.²⁶⁰

Kepler semble encore plus critique envers Fludd qu'envers les Pythagoriciens : cela s'explique en ce que ces derniers se sont trompés dans le contenu de leurs recherches, en vouant un culte

²⁵⁸ « Ex his paucis constare arbitror, etsi ad intelligenda mysteria conferta philosophiae profundissimae, quam tradit Robertus, cognitione proportionum harmonicarum omnino opus est, tamen illum, qui vel totum opus meum edidit, adhuc a mysteriis illis perplexissimis abfuturum haud paulo longius, ac ipsae ab accuratissima certitudine demonstrationum mathematicarum recesserunt. » *Opera omnia*, V, p. 334 ; *Harmonice mundi*, Appendice, trad. M. Carlier, dans PAULI ([1952] 2002), pp. 88-89.

²⁵⁹ C'est l'une des raisons pour lesquelles Kepler ne sera pas totalement satisfait de son *Astronomia nova*. Il faudra attendre les démonstrations de l'*Harmonice mundi* pour que l'astronome ait l'impression d'avoir enfin parachevé son œuvre.

²⁶⁰ « Ego tibi, mi Roberte, fateor, cum agitur de certitudine comprehensionis rerum, *elatum me esse omnino opinione non mea*, sed **communi mathematicorum omnium**, ut quaecunque tu tractas mathematica more Hermetico, seu strictiora seu remissiora, in contente habeam, idque non odio rerum ipsarum Hermeticarum seu mysteriorum naturae, sed ob id ipsum, quia nec capere mathematica nisi **per demonstrationes mathematicas**, nec in *penetralia tui Hermetis opacissima oculis mathematicis inspicere* unquam didici. » *Opera omnia*, V, p. 449 ; *Apologia*, Ad Analysin XVII (ma traduction). Les italiques sont dans le texte original. Je souligne (en caractères gras).

aux nombres et en prenant ceux-ci comme principes explicatifs (au lieu des figures géométriques), alors que les hermétiques se trompent dans leur méthode même en cultivant le mystère pour le mystère et en n'allant pas plus loin qu'une vague conception mathématico-obscur. Difficile donc de nier le caractère rationnel des recherches képlériennes alors que l'on voit que, malgré certaines idées néoplatoniciennes quasi mystiques, l'astronome cherchait néanmoins à faire reposer l'astronomie sur des fondements solides, où il n'y a pas de mathématisation du monde sans démonstrations mathématiques, garantes de la certitude. C'est maintenant sur ce volet mathématique que nous allons nous pencher.

3.3. Les sources mathématiques

Mathématicien de formation et de profession, Kepler était évidemment au fait des ouvrages principaux dans son domaine. Si ces derniers ne l'ont pas influencé comme tel dans sa conception d'une astronomie mathématique fondée sur les causes, ils l'ont toutefois guidé dans son utilisation desdites mathématiques. J'aborderai ici les quatre mathématiciens principaux l'ayant influencé : Euclide (325-265 av. J.-C.), Archimède (287-212 av. J.-C.), Apollonius (262-190 av. J.-C.) et Pappus d'Alexandrie (IV^{ème} siècle).

L'influence d'Euclide est probablement la plus évidente. Nous en avons vu l'importance dès le premier chapitre de cette thèse, où c'était Euclide qui avait démontré que seuls cinq solides réguliers étaient possibles. Une deuxième manifestation de cette influence a été relevée plus haut dans ce chapitre-ci, alors que Kepler s'inspirait des *Elementa* à la fois pour envisager les nombres parfaits (tels que définis par Euclide) comme principes explicatifs et pour ensuite les rejeter, en vertu du fait qu'il y était démontré que tout nombre parfait hormis le 6 sont des multiples de nombres premiers. Enfin, nous en avons vu une troisième manifestation alors que Kepler citait explicitement les *Commentaires sur le livre I des Éléments d'Euclide* de Proclus. Et il y a bien d'autres traces de l'influence euclidienne tout au long de l'œuvre képlérienne, lesquelles m'amènent à noter deux principaux apports généraux d'Euclide (hormis, évidemment, le contenu mathématique lui-même) pour la conception de l'astronomie nouvelle : 1) l'exigence d'utiliser une méthode déductive, à partir de définitions, d'axiomes ou de postulats, pour en tirer des théorèmes ou des propositions ; 2) la tendance à préconiser la géométrie.

Rappelons-nous que pour Kepler, l'astronomie peut se déployer de façon déductive, à partir de raisons *a priori*. Si cette méthode n'est pas utilisée telle quelle dans l'*Astronomia nova* (c'est plutôt dans l'*Harmonice mundi*²⁶¹ que la forme « définitions / postulats / propositions » est employée) elle n'en est pas moins recherchée, ultimement, comme méthode pouvant générer les bonnes réponses aux questions astronomiques. Tel qu'exprimé dans sa critique de Fludd, il n'y a pas de mathématiques sans démonstrations mathématiques ; une telle exigence est l'apanage euclidien par excellence. Cette exigence euclidienne est énoncée dès la deuxième phrase de l'*Astronomia nova* (Kepler mentionnant au passage qu'elle rend la lecture plus difficile), dont l'introduction débute ainsi :

Il est très difficile aujourd'hui d'écrire des livres mathématiques, en particulier des livres astronomiques. Car si tu conserves la rigueur authentique de la **démonstration, proposition, instruction, démonstration et conclusion**, le livre ne sera pas **mathématique** ; mais au contraire si tu la conserves, la lecture sera rendue très fatigante, surtout en langue latine [...].²⁶²

Je ne vais pas revenir ici sur le contenu mathématique comme tel – fréquemment utilisé par Kepler, par exemple dans son exigence, dans l'*Harmonice mundi*, de n'accepter que les figures constructibles par règle et compas, exigence que Kepler justifie en affirmant que ce sont les seules figures accessibles à la pensée²⁶³ – mais il est intéressant de noter que, malgré les apports des mathématiciens subséquents, il est fort probable que le contenu euclidien ait été suffisant pour l'astronome. C'est à tout le moins la conclusion à laquelle arrive l'historienne des mathématiques A.E.L. Davis : « Yet I have found that for his astronomical success Kepler relied on nothing more complicated than the methods and results of Euclid. »²⁶⁴ Nous verrons, lors de notre étude des arguments de l'*Astronomia nova*, que rien ne semble suggérer le contraire.

²⁶¹ Ouvrage dont l'introduction précise qu'il est intimement relié aux *Éléments*. Cf. *Opera omnia*, V, pp. 80-84.

²⁶² « Durissima est hodie conditio scribendi libros mathematicos, praecipue astronomicos. Nisi enim servaveris genuinam subtilitatem **propositionum, instructionum, demonstrationum, conclusionum**, liber non erit **mathematicus** ; sin autem servaveris, lectio efficitur morosissima, praesertim in Latina lingua [...]. » *Opera omnia*, III, p. 146 ; *Astronomia nova*, Introduction, p. 45 (ma traduction). Je souligne. Notons que Donahue remarque avec justesse, en note de bas de page, qu'est mentionnée ici la procédure formelle de la géométrie euclidienne.

²⁶³ En effet, « connaître, dans les choses géométriques, c'est mesurer au moyen d'une mesure connue » à savoir, le diamètre de ce cercle. « Scire in geometricis est mensurare per notam mensuram [...]. » *Opera omnia*, V, p. 85 ; *Harmonice mundi*, I, Définition VII (ma traduction).

²⁶⁴ DAVIS (1998), p. 37.

La tendance à préconiser un traitement géométrique des questions physiques se manifeste tout particulièrement dans l'*Astronomia nova*, notamment quant à deux choix théoriques qui peuvent sembler surprenants aux yeux de la science moderne. Le premier choix se manifeste alors que Kepler s'intéresse au mouvement des planètes et à la relation entre leurs vitesses et leurs distances au Soleil : il choisit alors de laisser de côté les vitesses (ou vitesses) instantanées comme paramètres et de plutôt s'intéresser aux intervalles temporels (ou délais) parcourus par la planète pour un arc donné. Selon Stephenson, cette décision est inspirée par le livre V des *Elementa* d'Euclide : comme les vitesses équivalent au quotient entre deux quantités de nature différente, elles ne peuvent pas être représentées géométriquement²⁶⁵ ; elles sont donc à rejeter et ne peuvent pas être utilisées pour exprimer la relation recherchée. Martens préfère y voir l'impact de la théorie des archétypes géométriques²⁶⁶, qui écarte toute représentation non géométrique d'une propriété physique. Certes ces deux raisons ne se contredisent pas et ont probablement joué un rôle important. Néanmoins il est bon de rappeler ici que Kepler n'avait pas accès aux outils prodigieux du calcul infinitésimal ; par conséquent, la notion de vitesse instantanée, « notion paradoxale qui implique négation aussi bien du déplacement que du temps »²⁶⁷, lui semble difficile à envisager et à traiter. C'est ce que note Eric J. Aiton : « The idea of instantaneous velocity was in fact foreign to Kepler, for whom elements of time no less than elements of distance were indivisible different from zero. »²⁶⁸ En comparaison, les outils géométriques euclidiens lui permettent parfaitement de créer des courbes illustrant la variation des intervalles de temps selon une distance angulaire invariable.

Le second choix théorique que je relèverai ici est sa décision de ne jamais traiter les distances comme de simples variables numériques, à insérer dans une relation mathématique ; au contraire, toute distance impliquée dans ces recherches doit pouvoir être constructible à partir d'une règle et d'un compas. Nous voyons bien que cette règle est une application, originale certes, mais directe de la règle de constructibilité par règle et par compas d'Euclide. C'est également l'opinion de Davis :

²⁶⁵ Cf. STEPHENSON (1987), p. 62.

²⁶⁶ Cf. MARTENS (2000), p. 85.

²⁶⁷ KOYRÉ (1961), p. 274.

²⁶⁸ AITON (1969), p. 75.

Kepler additionally applied the Euclidean method in a totally different way. Since the principles of Euclidean geometry – the postulates – did not permit numerical measurement of lengths, if a distance were required for a problem its end-points actually had to be constructed in advance, as intersections of straight lines and/or circles.²⁶⁹

Cette décision est également à mettre en lien avec ce que nous avons vu plus haut, sur le fait que les planètes doivent « connaître » leur trajectoire, ce qui est impossible si cette dernière n'est pas reconstituée géométriquement de cette façon.

Outre celle d'Euclide, l'influence d'Archimède se retrouve à quelques reprises dans l'*Astronomia nova*, quoique dans une moindre mesure et principalement pour la tâche calculatoire. Par exemple, aux chapitres 47 et 59, Kepler se servira de la méthode présentée dans le *Des conoïdes et des sphéroïdes* d'Archimède pour calculer l'aire sous une ellipse, méthode plutôt basique et ne faisant pas référence à un quelconque foyer (*focus*)²⁷⁰. À noter qu'à cette étape des recherches, Kepler penche plutôt en faveur d'une forme ovoïde, ou ovale, de l'orbite planétaire martienne ; l'ellipse n'est alors vue que comme une approximation : « Si notre figure avait été une ellipse parfaite, le travail aurait été accompli par Archimède [...]. Mais que cette figure soit une ellipse parfaite : elle en diffère très peu. »²⁷¹

Une autre application d'une technique archimédienne se retrouve au chapitre 40, d'une façon un peu surprenante chez un astronome et mathématicien aussi rigoureux que Kepler. Il en annonce les couleurs dès le titre du chapitre : « **Méthode imparfaite** pour calculer les équations à partir de l'hypothèse physique²⁷², qui **néanmoins suffit** pour la théorie du Soleil ou de la Terre »²⁷³. Par cette méthode, Kepler cherche à mesurer, pour un intervalle de temps fixe, les surfaces sous la courbe décrite par la Terre, en comprenant ces surfaces comme la somme des distances entre la Terre et le Soleil parcourues par la planète dans sa course autour

²⁶⁹ DAVIS (1998), p. 37.

²⁷⁰ Cf. WILSON (1968), note 43, p. 14.

²⁷¹ « Si figura nostra esset perfecta ellipsis, peractum esset ab Archimede negotium [...]. Sit autem haec figura perfecta ellipsis : parum enim differt. » *Opera omnia*, III, p. 345 ; *Astronomia nova*, XLVII, p. 469 (ma traduction). Dans ce passage, Kepler renvoie au *Des sphéroïdes* d'Archimède, prop. 6, 7 et 8, pour la méthode de calcul. Le commentateur et traducteur Donahue, dans KEPLER([1609] 1992), p. 469, remarque que cette définition renvoie aussi aux *Coniques* d'Apollonius, notamment en I.13.

²⁷² C'est-à-dire en effectuant les calculs à partir du Soleil vrai (et non le Soleil moyen). À cette étape de l'*Astronomia nova*, Kepler conçoit que l'orbite est circulaire.

²⁷³ « Methodus **imperfecta**, aequationes ex physica hypothesi computandi, quae **tamen sufficit** theoriae Solis vel Terrae » *Opera omnia*, III, p. 320 ; *Astronomia nova*, XL, p. 417 (ma traduction). Je souligne.

du Soleil²⁷⁴. Cherchant une façon d'approximer cette somme, après un essai pénible et compliqué, il se tourne alors vers la méthode d'exhaustion d'Archimède : « Car je me souvins que, jadis, Archimède, lorsqu'il cherchait le rapport de la circonférence au diamètre, avait, de la même manière, découpé le cercle en une infinité de triangles. »²⁷⁵ Cette méthode est toutefois jugée « imparfaite », non pas parce qu'elle n'est qu'approximative, mais parce qu'elle n'est pas applicable à des triangles qui se dressent de façon excentrique sur le cercle, comme c'est le cas de l'orbite terrestre par rapport au Soleil vrai. On a là un paralogisme gênant, mais il ne semble pas inquiéter Kepler, qui l'assume entièrement :

Mon argumentation contient un **paralogisme**, bien que de **peu d'importance**.

Lorsque Archimède divisa le cercle en une infinité de triangles, ces triangles étaient à **l'angle droit** par rapport à la circonférence, parce que leurs sommets [étaient] dans le centre B du cercle. Mais les triangles dont le sommet est en A n'ont pas le même rapport avec la circonférence, parce que les droites tirées de A à cette circonférence la coupent **obliquement** dans tous ses points, sauf en C et en D. On pourrait constater l'erreur aussi par expérience, ainsi que je l'ai fait [...].²⁷⁶

Cette technique de calcul inspirée d'Archimède est donc incorrectement utilisée ; mais Kepler juge que cela n'est pas important puisque, de façon agréablement fortuite, il a conscience, à rebours, que cette erreur se voit éventuellement compensée par une autre erreur, soit la supposition que l'orbite est circulaire. Malgré son imperfection, cette méthode est donc suffisante :

Pour répéter, donc, ce qui a déjà été dit : cette manière de [calculer] les équations est bien la plus rapide, et elle s'appuie sur les causes des mouvements naturels exposées ci-dessus ; en plus, dans le théorie du Soleil, ou de la Terre, elle s'accorde très exactement avec les observations ; néanmoins, elle pêche en deux points [...]. Or ces

²⁷⁴ Nous reviendrons plus en détail sur cette étape de la découverte de la seconde loi dans le prochain chapitre de cette thèse.

²⁷⁵ « Nam memineram, sic olim et Archimedem, cum circumferentiae proportionem ad diametrum quaereret, circulum in infinita triangula dissecuisse [...]. » *Opera omnia*, III, p. 321 ; *Astronomia nova*, XL, p. 418, trad. A. Koyré, dans KOYRÉ (1961), p. 234.

²⁷⁶ « Sed tamen **paralogismus** inest in argumentatione mea, **non magni** quidem **momenti**, ortus inde, quod Archimedes circulum secuit quidem in infinita triangula, sed **rectis angulis** circumferentiae insistentia, ut quorum vertices in B circuli centro. At triangulorum cum A vertice in circumferentia insistentium non est eadem, quia circumferentia a rectis ex A eductis ubique, praeterquam in C, D punctis **oblique** secatur. Et posses errorem experientia deprehendere, quod ipse quoque feci [...]. » *Opera omnia*, III, p. 323 ; *Astronomia nova*, XL, p. 422, trad. A. Koyré, dans KOYRÉ (1961), p. 236. Je souligne.

deux causes d'erreur, ce qui est comme un miracle, se suppriment l'une l'autre de la manière la plus exacte [...].²⁷⁷

Malgré les apparences, il faut se garder de voir là une forme d'instrumentalisme chez Kepler. Nous voyons d'ailleurs dans cet extrait que l'astronome est satisfait que cette méthode de calcul s'appuie sur les causes naturelles (donc qu'elle mette en jeu le Soleil vrai). En aucun cas Kepler ne saurait se satisfaire d'une simple tâche calculatrice de trajectoires, imparfaite de surcroît, même si elle s'accorde avec les observations – ce qui est déjà une tâche colossale, nous pouvons en convenir. Si Kepler conserve en long et en large ce passage dans l'*Astronomia nova*, c'est non seulement par souci de nous présenter toutes les étapes de ses recherches – telle est son habitude – mais aussi parce que, comme il l'écrit ultérieurement, dans une note à ce passage : « si l'on pose une orbite elliptique, cette méthode n'a plus de défauts ; ce qui est à noter »²⁷⁸. Il sera donc permis ultérieurement d'utiliser cette technique comme approximation d'une orbite (ovale ou elliptique). Il faudra toutefois apporter plusieurs modifications pour retracer l'orbite de la planète Mars et, comme nous le verrons au prochain chapitre, il restera beaucoup d'étapes à franchir avant d'en percer le secret. De plus, en cours de route, la méthode d'Archimède ne sera plus nécessaire pour décrire la position des planètes²⁷⁹. Il est toutefois à noter que c'est tout de même dans une application irrecevable d'une méthode archimédienne que Kepler aura proposé une première version de la loi des aires, alors qu'il adoptait une trajectoire circulaire. Et par le fait-même, nous avons là la preuve que la deuxième loi a bel et bien été pensée avant la première, ce qui n'est pas sans causer une certaine perplexité chez certains commentateurs, par exemple Johan Arnt Myrstad : « It is an astonishing fact that Kepler did not first find the geometry of the planetary orbits [...] and thereafter the kinematics. »²⁸⁰ Retenons simplement, pour l'instant, que ce « fait surprenant » trouve une partie de son explication dans l'utilisation initiale de cette méthode imparfaite mais suffisante pour calculer la trajectoire de la Terre par rapport au Soleil.

²⁷⁷ « Ut igitur repetam, quae jam sunt dicta, haec aequationum methodus compendiosissima quidem est, et naturalibus motuum causis hactenus explicatis innititur, sed et in theoria Solis vel Terrae scrupulosissime satisfacit observatis, sed tamen in duobus peccat [...]. [...] quarum tamen causarum altera alteram, quod miraculi loco sit, exactissime tollit [...]. » *Opera omnia*, III, p. 324 ; *Astronomia nova*, XL, pp. 423-424, trad. A. Koyré, dans KOYRÉ (1961), p. 237.

²⁷⁸ « Posita elliptica orbita planetae nihil peccat haec methodus. Nota ergo illam. » *Opera omnia*, III, p. 324 ; *Astronomia nova*, XL, p. 424, trad. A. Koyré, dans KOYRÉ (1961), p. 237.

²⁷⁹ En effet, comme l'a montré DAVIS (1998), dans les dernières étapes de l'*Astronomia nova*, la trajectoire elliptique des planètes est mise en lien avec la loi des aires, simplement avec les outils euclidiens.

²⁸⁰ MYRSTAD (2004), p. 327.

L'influence d'Apollonius de Perge, ayant pratiqué à la fois l'astronomie et les mathématiques, est certainement à rechercher plutôt du côté de ces dernières. En effet, Kepler le critique en tant qu'astronome dans son *Apologia pro Tychone* alors qu'il lui reproche son instrumentalisme, c'est-à-dire de ne s'être consacré qu'à la tâche de reconstruction géométrique des mouvements, sans tenir compte des fondements physiques :

Et donc nous n'avons pas encore d'hypothèses astronomiques d'Apollonius pouvant réellement être appelées ainsi et méritant d'être incluses parmi les autres types. Car lui, ce qu'il pose dans sa démonstration, il le pose non pas comme s'il pensait que c'était ainsi réellement (comme les praticiens en ont l'habitude) mais de façon à mettre au clair ce qui arriverait dans le cas des positions des planètes, si c'était ainsi que les choses étaient.²⁸¹

Apollonius bénéficie toutefois d'une meilleure appréciation quant à son travail de géomètre. Ainsi, à la fin du chapitre 60 de l'*Astronomia nova*, alors que Kepler se retrouve devant une difficulté d'ordre géométrique, il exhorte les géomètres à l'aider : « Quiconque me montre mon erreur et la voie à suivre, celui-là sera pour moi le **grand Apollonius** »²⁸².

C'est donc plutôt du côté des outils géométriques qu'Apollonius sera utile à Kepler. L'influence la plus marquante se retrouve dans un ouvrage publié cinq années avant l'*Astronomia nova* et consacré à l'optique²⁸³, dans lequel Kepler lui emprunte une notion qui se retrouve également dans les *Coniques* (III.45–52)²⁸⁴, soit celle de « points issus de l'application »²⁸⁵. Kepler désigne ce type de points – qui n'ont pas de noms dans l'ouvrage d'Apollonius – par le terme *focus*, foyer. Comme le résumait bien Bernard R. Goldstein et Giora Hon : « The coinage refers to the well known property of conoidal mirrors, namely, by focusing the Sun's rays material placed at the focal point will burn. Clearly, Kepler invokes a

²⁸¹ « Adhuc ergo nullas habemus Apollonij Hypotheses astronomicas, quae quidem sic dicj et inter caeteras formas recenserj mereantur. Quae enim ille supponit in demonstratione sua, non ita supponit, tanquam revera ita sese habere statuat (quod solent artifices) sed ita, ut patescat, quid circa stationes futurum esset, si illa ita haberent. » *Apologia pro Tychone contra Ursum*, in JARDINE (1984), p. 121 (ma traduction).

²⁸² « Erranti mihi quicumque viam monstraverit, is erit mihi **magnus Apollonius**. » *Opera omnia*, III, p. 411 ; *Astronomia nova*, LX, p. 601 (ma traduction). Je souligne.

²⁸³ *Ad Vitellionem paralipomena, quibus Astronomiae pars optica traditur* (1604).

²⁸⁴ Comme l'a souligné Donahue dans KEPLER ([1604] 2000), p. 107.

²⁸⁵ « τὰ ἐκ τῆς παραβολῆς γινόμενα σῆμεια » APOLLONIUS (1963), trad. P. Ver Eecke, p. 263. Le traducteur précise en note de bas de page qu'il s'agit des « points déterminés par suite de l'application, suivant l'axe, du rectangle caractéristique, augmenté ou diminué d'un carré suivant qu'il s'agit de l'hyperbole ou de l'ellipse ». *Idem*.

new term that is still used today, **without introducing a new referent.** »²⁸⁶ Pourtant, contrairement à ce que l'on pourrait croire (et ce qui est généralement cru par ceux qui ne connaissent pas le contenu des œuvres originales), Kepler ne reprend pas cette notion de foyer dans l'*Astronomia nova* – qui pourtant aurait pu lui être utile pour situer le lieu du Soleil dans l'ellipse finale. Ainsi, après lecture de l'ouvrage, on remarque comme Wilson cette absence de notion de foyer :

But where Kepler deals with the geometry of the ellipse in the *Astronomia nova*, there is no explicit dependence on either Apollonius' or his own earlier discussion of the focal properties. [...] There is no evidence that Kepler, on surveying the results of the distance determinations and their range of probable error, hit on the idea of the focus as a clue to the selection of the correct, sun-focused ellipse²⁸⁷.

Quant au second endroit – autre que le Soleil – où aurait pu se situer le deuxième foyer de l'ellipse, Kepler se contente de le dénommer « point excentrique » (< *punctum eccentricum* >)²⁸⁸.

Il faudra donc se tourner vers autre chose pour trouver l'influence d'Apollonius pour la nouvelle astronomie. Le réflexe normal serait de remarquer simplement que les *Coniques* traitent notamment des ellipses ; comme la première loi de Kepler conclut à la forme elliptique des orbites, il semble aller de soi que les recherches mathématiques d'Apollonius ont permis à l'astronome de mieux traiter ce problème. C'est là aussi une opinion répandue²⁸⁹ mais encore une fois, il faut se raviser suite à notre lecture de l'*Astronomia nova* : il n'est pas du tout évident que Kepler procède vraiment ainsi. L'historienne Davis relève le paradoxe :

one might have expected that the mould-breaking discovery – that planetary paths are conic sections – would be reached with the aid of the major classical work on the subject: the *Conics* of Apollonius. But the demonstrations set out here unequivocally vindicates my contention that in his astronomy Kepler just did not need anything that sophisticated ; and the solution to the mystery has required only repeated reliance on

²⁸⁶ GOLDSTEIN et HON (2005), p. 93. Je souligne.

²⁸⁷ WILSON (1968), p. 14.

²⁸⁸ Cette remarque est confirmée par DAVIS (2011), p. 94.

²⁸⁹ Et l'on pourrait y adhérer lorsque l'on constate que les *Coniques* sont mentionnés dès le paragraphe d'introduction de l'*Astronomia nova*, alors que Kepler affirme qu'il est difficile de rencontrer des lecteurs suffisamment préparés, notamment sur le plan des mathématiques : « Combien peu de mathématiciens y a-t-il, qui supportent de lire jusqu'au bout les *Coniques* d'Apollonius de Perge ? » « Quotusquisque mathematicorum est, qui tolerat laborem perlegendi Apollonii Pergaei Conica ? » *Opera omnia*, III, p. 146 ; *Astronomia nova*, Introduction, p. 45 (ma traduction).

Euclid's *Elements*, a work in which conic sections do not appear at all – the topic is not even mentioned.²⁹⁰

Les outils d'Apollonius seront toutefois utilisés dans un ouvrage postérieur, l'*Epitome astronomiae copernicanae* (1617-1621), par exemple son théorème prouvant que le « rapport de la surface de l'ellipse à la surface du cercle [...] est, comme celui du segment du cercle aux segments correspondants de l'ellipse, égal au rapport du grand au petit diamètre de l'ellipse »²⁹¹. Cela dit, il ne s'agit pas ici de dire que les mathématiques d'Apollonius n'ont joué aucun rôle pour les recherches de l'*Astronomia nova* : il s'agit simplement de noter qu'il est faux que Kepler s'y serve directement des *Coniques* pour élaborer ses deux premières lois. Précisons tout de même que, à l'époque où il effectuait ces recherches, Kepler était bien au fait qu'Apollonius, tout comme Archimède, avait développé des outils pour traiter des ellipses et qu'ils auraient pu se montrer utiles pour calculer les orbites ; mais il en était alors à soupçonner que les trajectoires étaient ovales, et donc ne pouvaient pas être traitées avec ces outils. Comme il l'écrivait dans une lettre à David Fabricius, datée du 4 juillet 1603 : « Il me manque seulement la connaissance de la génération géométrique du chemin ovale. [...] Si la figure était une ellipse parfaite, alors Archimède et Apollonius seraient suffisants. »²⁹² Il ne serait toutefois pas déraisonnable de supposer que l'idée de pouvoir comprendre géométriquement les courbes elliptiques ait pu permettre à notre astronome de s'affranchir plus aisément du paradigme circulaire, dont nous discuterons plus tard²⁹³ ; et lorsqu'il aura adopté la trajectoire elliptique, Kepler procédera à la démonstration de sa cohérence avec la loi des aires, au chapitre 59 de l'*Astronomia nova*, en utilisant explicitement la définition tirée des *Coniques* d'Apollonius pour construire cette ellipse à partir du cercle²⁹⁴.

L'influence de Pappus d'Alexandrie n'est pas non plus explicite dans l'*Astronomia nova*. Koyré affirme d'ailleurs que, « à cette époque, il [*sc.* Kepler] n'avait pas encore lu Pappus »²⁹⁵. À tout le moins, il faudra attendre l'*Harmonice mundi* pour en voir des

²⁹⁰ DAVIS (1998), p. 42.

²⁹¹ KOYRÉ (1961), p. 316. Cf. *Opera omnia*, V, p. 410 ; *Epitome*, V.

²⁹² « mihi deest : scientia geometricae generationis viae ovalis [...]. Si figura esset perfecta ellipsis, jam Archimedes et Apollonius satisfacissent. » *Opera omnia*, III, p. 77 (ma traduction). Cet extrait a été relevé par GINGERICH (2003), p. 65.

²⁹³ Au chapitre 4 de cette thèse.

²⁹⁴ *Opera omnia*, III, p. 401 ; *Astronomia nova*, LIX, p. 577.

²⁹⁵ KOYRÉ (1961), p. 313. Je n'ai malheureusement pas trouvé de preuve de cette affirmation, si ce n'est l'absence de référence explicite à Pappus. À noter que l'édition de Commandino était disponible dès 1589.

occurrences directes – notamment au livre I, alors que Kepler renvoie directement aux propositions 31 et 35 du livre IV des *Collectiones mathematicae* de Pappus²⁹⁶ en affirmant que l'on pourrait citer ces propositions pour faire une objection à ses propres démonstrations des figures harmoniques. Kepler le réfute d'ailleurs en montrant que la technique de Pappus peut être ramenée à l'utilisation des figures régulières imbriquées sur un cercle. Une autre influence de Pappus peut être vue au livre II de l'*Harmonice mundi* alors que Kepler prouve – pour la première fois²⁹⁷ dans l'histoire occidentale, semble-t-il – que seuls treize polyèdres convexes uniformes peuvent être construits. Or Pappus avait proposé cette même liste de ces treize solides, qu'il attribue à Archimède²⁹⁸, dans le livre V des *Collectiones mathematicae*²⁹⁹. Enfin, les outils mathématiques de Pappus seront, tout comme ceux d'Apollonius, utilisés positivement par Kepler dans son *Epitome astronomiae copernicanae*³⁰⁰.

Une autre influence de Pappus, quoique non explicite, pourrait se retrouver à un autre niveau, soit celui de la méthode à employer en science. Si nous nous tournons à nouveau vers l'*Apologia pro Tychone contra Ursum*, nous retrouvons un passage exprimant l'exigence de retracer toutes les étapes du calcul lorsque l'on démontre les mouvements :

Car nous décrivons d'abord la nature des choses dans les hypothèses, à partir desquelles nous construisons ensuite une méthode de calcul, c'est-à-dire que nous démontrons les mouvements ; enfin, nous expliquons aux apprenants les vraies règles de la méthode de calcul, en retraçant nos étapes.³⁰¹

Cette conception de la méthode scientifique pourrait renvoyer au début du VII^{ème} livre des *Collectiones mathematicae*, où Pappus traite de l'analyse et de la synthèse³⁰². Il décrit ainsi ces deux opérations :

L'analyse est donc la voie qui part de la chose cherchée, considérée comme étant concédée, pour aboutir, au moyen des conséquences qui en découlent, à la synthèse

²⁹⁶ Cf. *Opera omnia*, V, pp. 110-111 ; *Harmonice mundi*, I.

²⁹⁷ Cf. FIELD (1988), p. 107.

²⁹⁸ Le traité original d'Archimède a été perdu entre-temps ; c'est pourquoi je ne traite pas cette liste comme une influence d'Archimède mais plutôt de Pappus.

²⁹⁹ Au livre V, section XIX. Cf. PAPPUS (1933), trad. P. Ver Eecke, pp. 272-277.

³⁰⁰ Notamment la proposition 36, pour le calcul du mouvement de libration des planètes. Cf. *Opera omnia*, V, p. 407 ; *Epitome*, V.

³⁰¹ « Primum enim in hypothesibus rerum Naturam depingimus, post ex ijs calculum extruimus hoc est, motus demonstramus, Denique indidem vera calculj praecepta via reciproca discentibus explicamus. » *Apologia pro Tychone contra Ursum*, in JARDINE (1984), p. 95 (ma traduction).

³⁰² Je dois cette remarque au professeur François Duchesneau.

de ce qui a été concédé. En effet, supposant, dans l'analyse, que la chose cherchée est obtenue, on considère ce qui dérive de cette chose et ce dont elle est précédée, jusqu'à ce que, **revenant sur ses pas**, on aboutisse à une chose déjà connue ou qui rentre dans l'ordre des principes ; et l'on nomme cette voie l'analyse en tant qu'elle constitue un renversement de la solution. Dans la synthèse, au contraire, supposant la chose finalement perçue par l'analyse comme étant déjà obtenue, et disposant dès lors ses conséquences et ses causes dans leur ordre naturel, puis, **les rattachant les unes aux autres, on aboutit en dernier ressort à construire la chose cherchée** ; et c'est ce que nous appelons la synthèse.³⁰³

Si l'on relie ces deux extraits, démontrer les mouvements chez Kepler correspond à l'opération d'analyse, alors que retracer les étapes du calcul correspond à l'opération de synthèse démonstrative. Kepler applique donc ici ces deux techniques à l'astronomie nouvelle, jugeant que la synthèse est essentielle non seulement en mathématiques mais aussi en astronomie, en vertu de ses fondements *a priori*. Tout comme celle d'Euclide, l'exigence démonstrative du mathématicien Pappus se retrouve clairement dans les recherches képlériennes et il convient d'en tenir compte dans notre compréhension de la naissance de l'astronomie nouvelle.

Pour compléter notre tour d'horizon des sources, il nous reste à nous pencher sur les propos d'un savant ayant influencé Kepler d'une façon toute particulière, hors les mathématiques cette fois-ci.

3.4. L'influence du *De magnete* de Gilbert

Le savant anglais William Gilbert (1544-1603) publie un traité sur le magnétisme intitulé *De magnete* en 1600. Kepler en prend rapidement connaissance puisqu'il le cite déjà dans son *Apologia pro Tychone contra Ursum*³⁰⁴, où il note que les études de Gilbert permettent de combler un vide laissé dans le *Mysterium cosmographicum* : « Guillaume Gilbert l'Anglais semble avoir suppléé ce qui faisait défaut à mes arguments en faveur de Copernic, par son habileté admirable et son application à expérimenter dans le

³⁰³ PAPPUS (1933), trad. P. Ver Eecke, vol. II, p. 477. Je souligne.

³⁰⁴ Qui, comme nous l'avons noté au chapitre précédent, a été rédigé vers la fin de 1600.

magnétisme. »³⁰⁵ Selon Martens, il n'y a aucun indice laissant croire que Kepler était au courant d'un quelconque manque au sein des arguments de son premier ouvrage au moment de son écriture et de sa publication³⁰⁶. Il est vrai que, sur le plan de la cosmographie, il n'est pas nécessaire de chercher autre chose que les archétypes géométriques. Néanmoins l'astronomie étant selon Kepler une discipline mixte, elle ne saurait être complète sans inclure une explication des procédés par lesquels la nature peut se conformer à ces archétypes géométriques, de façon à souder, en quelque sorte, le lien entre physique et géométrie. En ce sens, l'apport de Gilbert est précieux : il permet de fournir l'explication d'un procédé, visible également à notre échelle, par lequel une force directrice pourrait émaner du Soleil et se transmettre à distance.

Dans l'*Astronomia nova*, Kepler cite expressément Gilbert à la fin du chapitre 34, alors qu'il s'interroge sur la nature de cette *species* dotée d'une *virtus motrix* qui semble être dans le Soleil et qui cause les révolutions des planètes. À ce moment de ses recherches, Kepler n'attribue pas encore une forme elliptique aux trajectoires, mais il attribue un pouvoir moteur au Soleil permettant de rendre compte du fait que les planètes ont une vitesse irrégulière lors de leur parcours orbital (circulaire et excentrique). Après s'être demandé si cette force motrice pouvait être comprise en procédant à une analogie avec la diffusion de la lumière, Kepler se tourne vers une seconde analogie, celle avec la force magnétique. Il conclut alors au bien-fondé de cette analogie :

Ainsi, alors que le Soleil se retourne perpétuellement, la force motrice ou l'écoulement des *species* à partir des fibres magnétiques du Soleil, diffusé à travers tous les intervalles des planètes, effectue une rotation dans un orbe, et il effectue une rotation au même moment avec le Soleil ; de la même manière que la vertu magnétique est transférée elle aussi lorsqu'un aimant est en déplacement, et le fer simultanément, en suivant la force magnétique elle-même.³⁰⁷

³⁰⁵ « quodque meis pro Copernico defuit argumentis, id admirabili solertia, experiundique industria supplese videtur Gilbertus Gulielmus Anglus, in re magnetica. » *Apologia pro Tychoe contra Ursum*, in JARDINE (1984), p. 94 (ma traduction).

³⁰⁶ Cf. MARTENS (2000), p. 179, n. 14.

³⁰⁷ « Sole itaque sese vertente perenniter, convertitur et in orbem vis motrix seu defluxus ille speciei a fibris Solis magneticis, per omnia planetarum diastemata diffusus, et convertitur eodem tempore cum Sole : non secus atque ad translationem magnetis ipsa quoque virtus magnetica transfertur et una ferrum ipsam vim magneticam insequens. » *Opera omnia*, III, p. 307 ; *Astronomia nova*, XXXIV, p. 390 (ma traduction).

Cette analogie semble fonctionner si bien que Kepler poursuit ensuite en se demandant si cette force ne serait pas réellement magnétique. C'est à ce moment que Gilbert est cité, ayant démontré que la Terre était un gigantesque aimant :

L'exemple de l'aimant est assurément très beau et s'accorde si bien avec la réalité qu'il s'en faut de peu qu'il ne puisse être considéré comme la représentant. Or donc, pourquoi fais-je de l'aimant seulement un exemple ? En effet, la Terre, ainsi qu'il a été démontré par Guillaume Gilbert, l'Anglais, est un grand aimant, qui, selon le même auteur (partisan de Copernic), accomplit ses révolutions diurnes, comme j'en fais la conjecture pour le Soleil : et cela parce qu'elle a des fibres magnétiques qui coupent à l'angle droit la ligne de son mouvement.³⁰⁸

Les propos de Gilbert auxquels se réfère Kepler se retrouvent dans le livre VI du *De magnete*, dont le premier chapitre s'intitule : « *De telluris globo, magno magnete* »³⁰⁹, soit « Du globe de la Terre, le grand aimant ». Kepler restera toutefois prudent et ne va pas identifier cette force motrice à une force magnétique pour autant. Il posera plutôt une analogie entre le mouvement lunaire (autour de la Terre, corps magnétique) et le mouvement des planètes (autour du Soleil) pour conclure que le Soleil est magnétique. C'est pourquoi cette assertion, fondée sur une analogie, ne sera jugée que « plausible » : « La conclusion est donc **plausible** : puisque la Terre meut la Lune par la *species*, et est un corps magnétique, et que le Soleil meut les planètes semblablement, par la *species* qu'il émet : le Soleil est également un corps magnétique. »³¹⁰ Tout au plus Kepler pourra dire que les deux forces impliquées se diffusent de la même manière. Je considère donc que Koyré fait très bien d'insister sur le fait que « l'analogie n'est pas identité »³¹¹ et que, dans le cas qui nous intéresse ici, l'action du Soleil sur les planètes ne se réduit pas à une action magnétique. Cela est d'ailleurs confirmé au chapitre suivant :

³⁰⁸ « Perbellum equidem attigi exemplum magnetis et omnino rei conveniens, ac parum abest quin res ipsa dici possit. Nam quid ego de magnete, tanquam de exemplo ? cum ipsa Tellus, Gulielmo Gilberto Anglo demonstrante, magnus quidam sit magnes, eademque eodem auctore, Copernici assertore, convolvatur in dies singulos, uti ego Solem volvi conjicio : et ob id ipsum, quia fibras habet magneticas, lineam motionis suae rectis angulis intersecantes [...] » *Opera omnia*, III, p. 307 ; *Astronomia nova*, XXXIV, pp. 390-391, trad. A. Koyré, dans KOYRÉ (1961), pp. 208-209. Kepler revient sur le fait que Gilbert a prouvé que la Terre était un aimant au chapitre 57. Cf. *Opera omnia*, III, p. 387 ; *Astronomia nova*, LVII, p. 550.

³⁰⁹ GILBERT (1600), p. 211.

³¹⁰ « Itaque **plausibile** est, cum Terra Lunam cieat per speciem, sitque corpus magneticum, et Sol planetas cieat similiter per emissam speciem : Solem itaque similiter corpus esse magneticum. » *Opera omnia*, III, p. 307 ; *Astronomia nova*, XXXIV, trad. A. Koyré, dans KOYRÉ (1961), p. 209. Je souligne.

³¹¹ KOYRÉ (1961), p. 210.

Donc, pour que nous puissions nier que le mouvement des astres est entravé par les conjonctions centrales de deux d'entre eux, il est nécessaire de dire que **la nature du Soleil diffère davantage de la nature des autres planètes que la nature de l'aimant ne diffère de la nature du fer** ; et [il est nécessaire de nier] que le fer absorbe immédiatement la vertu de l'aimant de la même manière que les planètes le font par rapport à celle du Soleil.³¹²

Cette analogie avec le magnétisme n'en sera pas moins particulièrement précieuse pour Kepler. Elle sera même plus féconde que l'analogie avec la lumière, en ce que le magnétisme implique des forces se propageant de façon rectiligne, proportionnelle à la distance, alors que la lumière se propage de façon surfacique, proportionnelle au carré de la distance. C'est là d'ailleurs l'un des deux apports principaux de Gilbert pour Kepler, selon Miller :

First, he [sc. Gilbert] corrected Kepler's method of representing magnetic action [...]. Earlier, Kepler had assumed that the planet's magnetic attraction was proportional to its bulk. [...] From Gilbert, however, Kepler has learned that magnetic virtue is fundamentally linear – it “extends in a right line”.³¹³

Avant de lire Gilbert, Kepler avait donc bel et bien pensé au magnétisme comme mécanisme, mais il n'en comprenait pas bien les rouages et ne pouvait s'en servir de façon satisfaisante pour le rendre compatible avec les trajectoires planétaires, qui semblaient être guidées depuis le Soleil selon une force motrice se propageant de façon rectiligne. L'un des apports importants de Gilbert est de lui avoir fourni des outils pour concevoir une force se diffusant de cette façon, comme Kepler l'écrit dans une lettre à David Fabricius datée du 11 octobre 1605 : « Car il est certain, à partir de Gilbert et par soi-même, sans son autorité, que la vertu magnétique se propage en ligne droite. »³¹⁴ À cette étape, Kepler est convaincu de la forme elliptique des trajectoires, mais il cherche un processus mécanique plausible permettant d'en rendre compte³¹⁵. Grâce à son analogie avec le magnétisme, il pourra ainsi concevoir, de façon cohérente avec la forme elliptique des trajectoires, que la *virtus motrix* du Soleil est une force

³¹² « Ut igitur negare possimus, motus siderum impediri centralibus duorum conjunctionibus, necesse est dicere, **Solis naturam plus differre a naturis siderum ceterorum, quam differt natura magnetis a natura ferri** : nec ut a magnete ferrum eandem subito virtutem combibit, sic a Sole planetas. » *Opera omnia*, III, p. 308 ; *Astronomia nova*, XXXV, p. 393 (ma traduction). Je souligne.

³¹³ MILLER (2008), p. 49.

³¹⁴ « Nam certum est ex Gilberto et per se etiam sine ejus auctoritate, virtutem magneticam porrigi in rectum. » *Opera omnia*, III, p. 103 (ma traduction).

³¹⁵ Je reprends ici la formulation de MILLER (2008), p. 49.

qui se propage de façon rectiligne, de la même façon qu'une force magnétique. Le Soleil la diffusera alors qu'il tourne sur lui-même, entraînant les planètes sur son passage ; mais il faudra alors expliquer pourquoi les planètes ne suivent pas une trajectoire uniforme. Pour ce faire, les planètes seront d'abord dotées d'une force interne, la *vis insita*, les amenant à résister à la *virtus motrix* ; ensuite, elles seront dotées d'une « faculté animale » luttant avec la faculté magnétique ; en dernier lieu, elles seront simplement munies d'une intelligence dotée d'une faculté magnétique les guidant dans leur trajectoire par rapport au Soleil, ce qui sera suffisant pour expliquer pourquoi elles ne se déplacent pas selon un mouvement uniforme circulaire³¹⁶. Cela dit, l'astronome n'abandonnera pas son analogie avec la lumière, loin de là ; il tentera plutôt de comprendre comment la lumière peut être conçue comme une entité se diffusant également de façon rectiligne, non sans quelques difficultés³¹⁷.

Le second apport de Gilbert, selon Miller, est d'avoir offert à Kepler le concept d'une direction définie non pas en relation avec un centre, mais en relation avec une orientation spatiale³¹⁸. Gilbert s'y prenait ainsi afin d'expliquer le « troisième mouvement » de Copernic³¹⁹, mouvement devenu inutile si l'on conçoit que les deux premiers mouvements (rotation et révolution) sont indépendants. Il suffit alors de poser que la Terre conserve le même axe, parallèle à lui-même en tout temps, ce que fait Gilbert au deuxième chapitre du livre VI du *De magnete*, intitulé : « *Magneticus axis telluris inuariabilis permanet* », soit « L'axe magnétique de la terre demeure invariable »³²⁰. Kepler procède de la même façon dans le chapitre 57 – en créditant Gilbert au passage³²¹ – ce qui lui permet d'obtenir un nouveau point de référence, soit l'axe de rotation des planètes, qui demeure parallèle à lui-même en tout temps et à partir duquel les planètes peuvent s'orienter. Néanmoins, Kepler aura besoin d'expliquer pourquoi cet axe demeure en tout temps parallèle à lui-même malgré « sa nature

³¹⁶ Nous reviendrons sur ces étapes dans le prochain chapitre.

³¹⁷ Comme le note KOYRÉ (1961), p. 214, au sujet de cette étape délicate : « Le raisonnement de Kepler [...] n'est pas très fort. »

³¹⁸ Cf. MILLER (2008), p. 55.

³¹⁹ Ce mouvement de déclinaison avait été introduit par Copernic, qui croyait que les deux premiers mouvements (rotation et révolution) étaient dépendants l'un de l'autre ; il fallait alors un troisième mouvement pour s'assurer du parallélisme de l'axe de rotation.

³²⁰ GILBERT (1600), p. 212.

³²¹ Cf. *Opera omnia*, III, p. 387 ; *Astronomia nova*, LVII, p. 550.

magnétique cherchant à atteindre le Soleil »³²², qui le pousserait à se réorienter continuellement lors du mouvement de révolution ; c'est pour cette raison notamment qu'il envisagera la possibilité de l'existence d'une faculté animale (< *facultas animalia* >) compensant la tendance magnétique de l'axe qui est de se diriger vers le Soleil. On obtient alors des planètes dont l'intelligence est dotée à la fois d'une faculté magnétique et d'une faculté animale ; et c'est en sentant la lutte constante entre les deux que l'intelligence planétaire peut ainsi connaître et mesurer adéquatement la trajectoire qu'elle doit suivre autour du Soleil :

C'est pourquoi il nous a fallu la [*sc.* l'intelligence] munir d'une faculté animale et d'une faculté magnétique, et imaginer une lutte entre les deux qui rappellerait à l'intelligence son devoir, qui n'aurait pas pu être rappelé par l'égalité soit des temps ou des espaces traversés.³²³

Cette « faculté animale » sera toutefois abandonnée au profit d'une explication relevant uniquement de l'intelligence des planètes dotée d'une faculté magnétique³²⁴.

Malgré un certain succès de ses explications magnétiques, Kepler demeure toutefois dubitatif face à elles. Il le remarque lui-même dans ce même chapitre, ne parlant ici que d'une possibilité : « Il me suffit que la possibilité en général de cette chose soit démontrée à partir de cet exemple magnétique. Mais en ce qui concerne la chose elle-même de façon spécifique, je suis dans l'incertitude. »³²⁵ Cette incertitude n'empêche pas Kepler d'être relativement satisfait d'avoir trouvé un mécanisme plausible pouvant rendre compte des trajectoires elliptiques suivies par les planètes.

Pour ma part, je crois que pour Kepler, outre le fait qu'il représente une force agissant à distance, l'avantage conceptuel du magnétisme est qu'il s'agit d'une force se déclinant de deux façons. Comme il le note lui-même au passage : « Prenons encore l'exemple d'un aimant. En lui sont manifestement combinées deux vertus, l'une de le diriger vers le pôle,

³²² « *suam magneticam naturam Solis appetentem* » *Opera omnia*, III, p. 388 ; *Astronomia nova*, LVII, p. 550 (ma traduction).

³²³ « *Propterea nobis fuit opus, illum [*sc.* mentis] instruere facultate animali atque magnetica, et pugnam utriusque comminisci, qua mens admoneretur de officio suo, de quo nec temporis nec spatiorum confectorum aequalitate admoneri potuit.* » *Opera omnia*, III, p. 396 ; *Astronomia nova*, LVII, p. 569 (ma traduction).

³²⁴ Nous y reviendrons au chapitre 4 de cette thèse.

³²⁵ « *Sufficit mihi ex hoc exemplo magnetis demonstrasse possibilitatem rei in genere. Ceterum de re ipsa in specie ambigo.* » *Opera omnia*, III, p. 392 ; *Astronomia nova*, LVII, p. 559 (ma traduction).

l'autre de chercher à atteindre le fer. »³²⁶ En effet, le magnétisme est d'un côté une force purement attractive – tout aimant attire le fer – et d'un autre côté, une force orientée – pouvant attirer, repousser, ou n'avoir aucun effet selon les différentes positions des pôles magnétiques des objets impliqués. Cela lui confère un potentiel explicatif énorme, du point de vue de la physique : il suffit de conférer au Soleil une force semblable, attirant les planètes mais de façon orientée, selon un mouvement qui n'est pas parfaitement régulier. Cela permet aussi de supposer que les planètes se déplacent dans un espace qui se comprend de façon orientée (autour d'un axe) et non en simple relation avec un centre. Certes, ces spéculations magnétiques demandent à Kepler de raffiner ses explications et l'on peut parfois avoir l'impression que cela complique encore plus ses propos, en ne rajoutant rien d'intéressant à la description géométrique des mouvements. Mais tout cela se comprend mieux suite à ce que nous avons vu jusqu'à présent quant aux objectifs de la nouvelle astronomie : l'apport de Gilbert est essentiel puisqu'ainsi, les trajectoires géométriques deviennent plausibles. Comme le remarque très justement Miller au sujet de Gilbert: « The ellipse becomes a physically possible orbit. »³²⁷ Et même s'il faudra attendre Newton pour avoir une explication pleinement satisfaisante, via le concept de gravité, le magnétisme de Gilbert aura eu un impact fondamental, bien que temporaire, pour la fondation de la nouvelle astronomie.

D'autres sources ont certainement influencé Kepler pour la fondation de sa nouvelle astronomie *aitiológētos* ou physique céleste, mais nous arrêterons ici cette étude puisque nous avons déjà en main l'essentiel pour aborder de façon éclairée les arguments de l'*Astronomia nova*. Il me semblait crucial de procéder à cette étude des sources afin de mettre en lumière le projet de Kepler et de voir jusqu'à quel point et en quel sens il s'agit d'une « nouvelle » astronomie. C'est toujours en gardant cette idée à l'esprit que nous verrons comment se présentent les arguments scientifiques de l'*Astronomia nova*, plus particulièrement ceux ayant donné le coup d'envoi à la révolution scientifique.

³²⁶« Exemplum rursum capiamus ex magnete. In eo manifestissime permixtae sunt duae virtutes, altera directionis ad polum, altera ferri appetens. » *Opera omnia*, III, p. 289 ; *Astronomia nova*, LVII, p. 553 (ma traduction).

³²⁷ MILLER (2008), p. 56.

Chapitre 4

Les recherches scientifiques de l'*Astronomia nova*

De l'*Astronomia nova*, on a retenu essentiellement deux des trois lois du mouvement planétaire regroupées sous le vocable « lois de Kepler » et qui sont encore utilisées aujourd'hui comme une bonne approximation : la première, dite loi des orbites, énonce que les planètes se meuvent selon une trajectoire elliptique dont le Soleil est l'un des foyers ; la seconde, dite loi des aires, affirme que le rayon qui relie le Soleil à une planète balaie des aires égales en temps égaux. Ces lois allaient être complètement entérinées lorsque Newton montrerait, dans le livre III de ses *Philosophiae naturalis principia mathematica*³²⁸, qu'elles dérivait naturellement de la loi de la gravitation universelle. Néanmoins, malgré son importance immense pour la révolution ayant mené à l'astronomie moderne, l'*Astronomia nova* demeure une œuvre relativement peu lue si on la compare, par exemple, aux œuvres contemporaines de Galilée. La chose se comprend aisément lorsqu'on ouvre le livre pour la première fois : en lisant le plan très détaillé de l'ouvrage présenté dès le début, on remarque rapidement qu'il n'est pas destiné à un grand public mais à un auditoire scientifique spécialisé. L'ordre d'exposition est également problématique : Kepler, fidèle à ses habitudes, ne s'en tient pas aux résultats probants ni à une exposition pédagogique de ses trouvailles, mais il relate chacune des étapes de ses recherches – même celles qui l'ont poussé à rebrousser chemin – et ce, bien qu'il ait retravaillé – voire réécrit³²⁹ – son traité avant de le publier. Or lire un traité scientifique contenant des « erreurs » ou suivant l'ordre de découverte, plutôt que l'ordre de justification, peut en rebuter plus d'un. D'autres obstacles se dressent pour nous qui faisons face à la distance historique : les astrophysiciens de notre époque ne sont pas formés pour comprendre les méthodes ni les outils mathématiques employés dans l'*Astronomia nova*, qui ne sont pas les mêmes que ceux d'aujourd'hui. Enfin, la langue a longtemps été un facteur rendant l'œuvre inaccessible pour tous ceux qui ne comprenaient pas le latin et qui ont donc dû se contenter des extraits traduits et étudiés par les historiens des sciences dans leurs

³²⁸ Cf. NEWTON ([1687] 1972).

³²⁹ Cf. STEPHENSON (1987), p. 3.

ouvrages spécialisés. Cette barrière a toutefois disparu en 1992 lorsqu’une première traduction anglaise complète fut enfin publiée, celle de William H. Donahue³³⁰, qui complétait ainsi le travail débuté par Owen Gingerich, qui l’appuya totalement dans ce projet notamment en lui confiant ses propres traductions effectuées en collaboration avec des étudiants qui avaient travaillé avec lui. Une première traduction complète en français (et c’est la seule disponible à ce jour) avait cependant été proposée dès 1979 par Jean Peyroux³³¹ aux éditions Albert Blanchard ; mais sans rien enlever au mérite d’avoir tenté de rendre l’*Astronomia nova* disponible aux lecteurs ne lisant pas le latin, les innombrables erreurs de traduction la rendent pratiquement inutilisable, voire incompréhensible. Du côté allemand, on avait déjà la traduction de Max Caspar en 1929³³² mais elle a été relativement peu diffusée.

Même si plusieurs chercheurs s’étaient déjà sérieusement penchés sur le contenu de l’*Astronomia nova*³³³, la parution de la traduction de Donahue a sans doute donné un nouveau souffle aux études de cet ouvrage majeur, sous forme de monographies et surtout d’articles spécialisés, depuis 1992 jusqu’à ce jour. Mais bien qu’elle nous soit maintenant plus accessible et, qu’en plus d’une traduction fiable, nous ayons accès à plusieurs ressources et commentaires pouvant nous guider, l’*Astronomia nova* demeure une œuvre dont la lecture n’est pas aisée, de par sa forme comme de par son contenu. Kepler reconnaît lui-même par endroits que le lecteur peut trouver cette lecture pénible et ennuyeuse ; c’est le cas notamment dans cet extrait du chapitre 16, où il nous fait remarquer toutefois que si c’est le cas, c’est plutôt lui que nous devrions plaindre : « Si cette méthode laborieuse te remplit de lassitude, elle devrait plus justement te remplir de compassion pour moi, qui l’ai parcourue au moins soixante-dix fois, en sacrifiant beaucoup de temps [...]. »³³⁴ Notons que la méthode précise dont il est question dans cet extrait est effectivement problématique. Alexandre Koyré se montre d’ailleurs assez critique à cet endroit : « La méthode semi-empirique suivie par Kepler [...] est, de toute évidence, laborieuse et très imparfaite. »³³⁵ Avoir de la compassion – fort

³³⁰ KEPLER ([1609] 1992), trad. W. H. Donahue.

³³¹ KEPLER ([1609] 1979), trad. J. Peyroux. Cette traduction ne sera pas utilisée ni mentionnée ailleurs dans cette thèse.

³³² KEPLER ([1609] 1929, trad. M. Caspar.

³³³ Par exemple, AITON (1969), DAVIS (1992), KOYRÉ (1961), SIMON (1979), SMALL ([1804] 1963), STEPHENSON (1987), WILSON (1968) et WILSON (1970).

³³⁴ « Si te hujus laboriosae methodi pertaesum fuerit, jure mei te misereat, qui eam ad minimum septuagies ivi cum plurima temporis jactura [...]. » *Opera omnia*, III, p. 245 ; *Astronomia nova*, XVI, p. 256 (ma traduction).

³³⁵ KOYRÉ (1961), p. 397.

méritée – pour l’astronome ne nous empêche pas d’être parfois étourdi à la lecture d’une œuvre relatant davantage des recherches parfois erratiques que des résultats bien ordonnés ; et bien des démonstrations demeurent incomplètes, dont certaines seront poursuivies parfois plusieurs chapitres plus loin, alors que d’autres seront simplement abandonnées en cours de route.

Il est toutefois possible d’en tirer plusieurs éléments intéressants pour mieux comprendre la révolution astronomique, et c’est avec cette idée en tête que je choisis de présenter ici les arguments scientifiques ayant formé le contenu de l’astronomie nouvelle de Kepler. C’est donc dire que je ne vais pas proposer ici une analyse détaillée de chacune des pages de l’*Astronomia nova* ; non seulement l’espace nous manquerait, mais cette entreprise risquerait de nous faire perdre de vue le fil conducteur de cette thèse. Comme le remarque justement Gingerich dans sa préface à la traduction de Donahue : « Kepler’s *Astronomia nova* is more a book to be mined than to be read »³³⁶ et c’est dans cet esprit que je propose d’en extraire plutôt les points capitaux, dont certains ont déjà été abordés précédemment, afin de dégager une première compréhension de la démarche scientifique képlérienne, plus précisément de la naissance et de l’évaluation (théorique et empirique) des hypothèses ayant fondé l’astronomie nouvelle. C’est cette compréhension qui nous servira de point de référence lorsque nous aborderons la deuxième partie de cette thèse.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons plus particulièrement aux étapes ayant mené à la loi des aires et à la loi des orbites elliptiques. À noter que je n’ai pas voulu réduire pour autant l’*Astronomia nova* au succès des deux lois de Kepler, bien au contraire ; ainsi, les étapes qui me semblent importantes pour l’élaboration de l’astronomie nouvelle seront conservées, même lorsqu’elles auront fini par mener à de fausses pistes. C’est d’ailleurs pour rester bien près de l’ordre de découverte et de démonstration de Kepler que la seconde loi est présentée avant la première. Nous commencerons par voir **(4.1.)** le premier modèle de Mars que Kepler élabore, propose, teste, puis rejette ; nous nous intéresserons particulièrement aux raisons (naturelles, métaphysiques, empiriques ou autres) qui seront à l’œuvre dans ce processus. Nous verrons ensuite **(4.2.)** comment Kepler règle la question du mouvement la Terre, tout en s’orientant vers une étude dynamique du problème. L’étape suivante sera de voir

³³⁶ KEPLER ([1609] 1992), trad. W. H. Donahue, p. xii.

(4.3.) la naissance comme telle de la loi des aires, processus qui se déroulera en plusieurs étapes. Nous terminerons avec (4.4) la formulation de la loi des trajectoires elliptiques.

4.1. Le premier modèle de Mars : l'*hypothesis vicaria*

L'*Astronomia nova* se divise en 70 chapitres, regroupés en cinq parties. Dans la première partie (chapitres 1 à 6), Kepler commence à traiter de l'orbite de Mars en apportant une nouveauté par rapport à ses prédécesseurs – que ce soit Ptolémée, Copernic ou Tycho Brahe – dont les modèles ne correspondent plus aux observations : il choisit d'effectuer ses calculs en se fondant non pas sur la position moyenne du Soleil (*Sol medius*, Soleil moyen) mais sur sa position réelle (*Sol apparens*, Soleil vrai)³³⁷. Nous avons vu dans les chapitres précédents les raisons *a priori* (métaphysiques et physiques) appuyant ce choix. Dans l'*Astronomia nova*, Kepler s'intéresse aux conséquences empiriques de ce remplacement afin de le justifier de façon *a posteriori*.

La tâche de vérification empirique de ce remplacement est cependant loin d'être aisée. Mais en plaçant le Soleil vrai comme point de référence dans la reconstruction des orbites, Kepler croit avoir trouvé un grand avantage, qui va comme suit. Précisons tout d'abord qu'à cette étape, les orbites envisagées sont parfaitement circulaires – ou comprises comme une construction de plusieurs cercles. Kepler choisit également de vérifier autant les modèles centrés sur le Soleil (Copernic) que ceux centrés sur la Terre (Ptolémée) ou mixtes, où tous les astres sauf la Terre tournent autour du Soleil, lequel tourne autour de la Terre (Tycho Brahe) ; Kepler montrera d'ailleurs que ces trois hypothèses sont à peu près équivalentes si l'on n'utilise pas le Soleil vrai mais le Soleil moyen, et que c'est dans le choix entre ces deux Soleils que réside une véritable différence. Mais voyons comment cette différence se manifeste dans le cas du modèle de Copernic. Ce dernier emploie une orbite circulaire excentrique, c'est-à-dire que le centre de la trajectoire circulaire ne correspond pas exactement au centre du monde³³⁸ ; dans ce cas particulier, le centre de l'orbite terrestre ne coïncide pas tout à fait avec le Soleil vrai. Pour correspondre avec les données, qui ne correspondaient pas à

³³⁷ Nous avons abordé ce remplacement à la section 3.1.

³³⁸ Le centre du monde (Soleil ou Terre), dans les modèles excentriques, n'est donc pas un centre au sens strict du terme puisqu'il diffère du centre des orbites des planètes, qui est désigné par le vocable « centre de l'excentrique ».

un mouvement uniforme circulaire des planètes, Copernic ajoutait des épicycles, c'est-à-dire des cercles supplémentaires que la planète parcourt autour d'un déférent, lui-même en orbite circulaire autour du centre du monde. Or Kepler rejette les épicycles pour les raisons que nous avons vues au chapitre 3 : il est impossible qu'un point vide, purement géométrique, ait un rôle à jouer dans la trajectoire des planètes. Pour rendre compte de la non-uniformité du mouvement circulaire des planètes, Kepler choisit d'introduire, comme le faisait Ptolémée, un point équant, soit un point depuis lequel les planètes semblent avoir une vitesse angulaire uniforme. Si l'on trace la ligne des apsides (c'est-à-dire la ligne qui correspond au diamètre du cercle passant par les trois points suivants : Soleil, centre de l'orbite excentrique et point équant), nous obtenons deux lignes des apsides différentes selon que nous employions le Soleil vrai ou le Soleil moyen. Or la ligne des apsides, dans le cas du Soleil moyen, est problématique puisque le point où la planète a la vitesse la plus basse ne correspond pas au point où la planète est la plus éloignée du Soleil ; ce qui est résolu lorsque l'on utilise le Soleil vrai. Deux avantages sont donc présents ici : d'une part, une forme de symétrie, ou simplicité, qui s'accorde bien avec la théorie des archétypes mathématiques ; d'autre part, une concordance avec le besoin d'ancrer l'astronomie dans la physique : une corrélation directe entre la vitesse d'une planète et sa distance au Soleil laisse croire que ce dernier pourrait être la cause de son mouvement, ce qui rend cette hypothèse fort plausible.

Même si l'on jongle ici avec des reconstructions de mouvement à partir des observations, la démonstration du chapitre 6 n'est évidemment pas une confirmation empirique pour autant. Comme le remarque Martens, au sujet de cette utilisation du Soleil vrai : « This important starting point, however, was not well confirmed by empirical arguments until much later in the *Astronomia*. »³³⁹ Effectivement, il faudra attendre le chapitre 52 pour que Kepler considère que cette hypothèse est empiriquement confirmée, à partir des observations. Or, comme le reconnaît Kepler lui-même dans ce chapitre 6, dans un extrait que nous avons vu précédemment³⁴⁰ et qu'il convient de citer à nouveau (mais sous une forme tronquée) :

Une porte est donc ouverte pour nous afin de décider à partir des observations de ce que j'ai déduit *a priori* et en considérant les causes du mouvement : que **la ligne des**

³³⁹ MARTENS (2000), p. 72.

³⁴⁰ À la section 3.1 de cette thèse.

apsides [...] passe par le centre même du corps du Soleil et non (comme les spécialistes l'ont placée) au-delà du Soleil. Durant ce travail je vais démontrer cela à partir des observations, dans les parties 4 et 5.³⁴¹

Kepler considère donc que les avantages de son modèle forment des arguments de type *a priori*, et c'est effectivement à partir de la quatrième partie que la supériorité de son modèle quant à l'adéquation avec les données sera montrée.

Néanmoins, dans la deuxième partie (chapitres 7 à 21), certains avantages empiriques de ce remplacement seront déjà trouvés. Dans les chapitres 12 à 14, Kepler se penche sur le problème de la détermination de l'inclinaison de l'orbite de Mars par rapport au plan de l'écliptique (soit la ligne représentant le trajet parcouru par le mouvement annuel apparent du Soleil ; dans un système héliocentrique, il s'agit du plan de l'orbite terrestre). En faisant passer la ligne des apsides par le Soleil vrai, Kepler « remporte sa première “victoire” dans la guerre contre Mars »³⁴², pour reprendre la métaphore de Koyré : il obtient que l'inclinaison de Mars est constante et en établit la valeur (soit 1°50'). Or les modèles précédents, qui faisaient passer le plan de l'orbite martienne par des points différents (la Terre pour Ptolémée, le centre de l'orbite terrestre pour Copernic, le Soleil moyen pour Tycho Brahe) nous faisaient obtenir chacun des inclinaisons qui variaient, de façon oscillatoire, dans le temps. On obtient là les mêmes avantages que pour l'adoption du Soleil vrai : la simplicité encouragée par les archétypes et le fait de ne plus avoir à expliquer, par une cause physique (qui demeurerait inconnue, et maintenant devenue inutile), le mouvement de libration auparavant accordé au plan de l'inclinaison de Mars.

Pour y arriver, Kepler devra d'abord établir l'emplacement de ses nœuds (c'est-à-dire des deux endroits opposés où l'orbite de Mars coupe l'écliptique). En utilisant le Soleil vrai, en abandonnant les épicycles et en utilisant un point équant, Kepler obtiendra que les nœuds de Mars se retrouvent parfaitement en opposition (c'est-à-dire que leurs longitudes³⁴³ diffèrent exactement de 180°). Il a donc le signe que, dans ce modèle, l'inclinaison de l'orbite est

³⁴¹ « Aperta igitur est nobis janua per observationes quoque statuendi de eo, quod a priori et a consideratione causarum motricium deduxeram ; scilicet **lineam apsidum** [...] non praeter Solem (ut artificibus placet), sed **per ipsum centrum corporis Solis transire**. Hoc autem in successu operis demonstrabo ex observationibus parte quarta et quinta. » *Opera omnia*, III, p. 199 ; *Astronomia nova*, VI, p. 167 (ma traduction). Je souligne.

³⁴² KOYRÉ (1961), p. 172.

³⁴³ La longitude, en astronomie, correspond à la coordonnée d'une planète donnant sa position par rapport au point vernal, soit le point de l'écliptique où le Soleil se trouve lors de l'équinoxe de printemps.

invariable. Il reste ensuite à calculer cette dernière, au moyen de trois techniques³⁴⁴ différentes et en puisant dans les nombreuses observations de Tycho Brahe. Ces techniques requièrent parfois certaines données qui ne sont pas encore connues exactement, comme certaines proportions d'orbites ; mais comme elles coïncident toutes les trois approximativement avec la même valeur, soit 1°50', Kepler a un bon indice de croire qu'il est sur la bonne voie.

Fort de cette trouvaille, il calcule alors, à partir des données observationnelles, les différents paramètres de ce qui constitue alors son premier modèle de Mars. Ce dernier a les caractéristiques suivantes : orbite circulaire et excentrique, point équiant, ligne des apsides passant par le Soleil vrai. Il s'agit d'une véritable innovation par rapport aux trois autres modèles concurrents (soit ceux de Ptolémée, de Copernic et de Tycho Brahe) qui, selon Kepler, sont à peu près équivalents sur le plan de la reconstruction des mouvements – évidemment, Kepler en tant que réaliste ne saurait dire qu'ils sont véritablement équivalents³⁴⁵.

C'est au chapitre 16 que Kepler procède à ce calcul de l'orbite de Mars. En utilisant uniquement la trigonométrie, l'astronome tente d'établir notamment la position du point équiant. À noter qu'il refuse de faire comme Ptolémée, qui prônait la bissection de l'excentricité, c'est-à-dire la position du centre de l'excentrique à égale distance du point équiant et du centre du monde. Kepler préfère établir la position de l'équiant sur des bases purement observationnelles. Au sujet de ce choix, Koyré y voit un glissement vers l'*a posteriori* influencé par Tycho Brahe: « on voit par là même combien l'aprioriste impénitent du *Mysterium Cosmographicum* avait été influencé par Tycho Brahe »³⁴⁶. Pour ma part, je préfère y voir simplement le fait que, pour Kepler, le point équiant n'est pas un point physique comme tel : son existence est nécessaire, compte tenu que la source du mouvement est attribuée de façon très probable au Soleil³⁴⁷, que l'orbite est excentrique et que les épicycles doivent être abandonnés, mais il suffit que le Soleil vrai soit sur la ligne des apsides (ligne qui

³⁴⁴ Elles sont expliquées et illustrées par des schémas dans SIMON (1979), pp. 313-314.

³⁴⁵ Il peut d'ailleurs nous sembler curieux que, parmi ces trois modèles, ce soit celui de Ptolémée qui sera « préféré » par Kepler. Il ne faut pas y voir un rejet de l'héliocentrisme pour autant ; simplement, l'avantage du modèle ptoléméen est qu'il permet de s'affranchir des épicycles (inexplicables par des raisons physiques) grâce au point équiant, que Kepler introduit dans ce premier modèle et qui permet d'assumer que, réellement, les planètes ont une vitesse variable. Nous y reviendrons plus loin.

³⁴⁶ KOYRÉ (1961), p. 173.

³⁴⁷ Kepler démontre la nécessité physique de l'existence d'un point équiant dans le chapitre 22 du *Mysterium cosmographicum*.

relie le point équiant au centre du monde) pour obtenir un modèle satisfaisant à ses yeux. Autrement dit, même si la symétrie est souhaitable (eu égard aux archétypes), elle n'est pas obligatoire dans le cas du point équiant, qui n'est qu'un point de repère et dont la position exacte ne peut être justifiée *a priori*. Après avoir insisté sur l'aspect très empiriste de cette étape, Koyré précise lui-même cette nuance :

En outre, des raisonnements *a priori* légitimes, il faut bien distinguer ces assertions **pseudo-aprioriques** qui, en fait, ne reposent sur rien. [Il en va] ainsi [de] la bissection de l'excentricité que Ptolémée adopte sans l'appuyer par une démonstration. Sans doute un arrangement symétrique paraît-il raisonnable. Mais est-il vraiment nécessaire ?³⁴⁸

C'est donc dire que, même à cette étape, il ne s'agit pas pour Kepler de s'affranchir des raisonnements *a priori*, mais de distinguer les assertions fondées de celles qui ne sont pas légitimes. Nous retrouvons d'ailleurs la même situation dans l'*Harmonice mundi*, quant à la troisième loi ($T^2/R^3 = k$, où T représente la période d'une planète, R sa distance moyenne au Soleil ; k est une constante) : même si elle est issue, en partie, d'un tâtonnement empirique – puisque les spéculations harmoniques ne permettaient pas à l'astronome de déduire directement le rapport sesquialtère –, ces raisonnements fondés *a priori* ne sont pas abandonnés pour autant et jouent un rôle crucial dans sa découverte³⁴⁹.

Le calcul de la position du point équiant doit donc être établi de façon empirique, mais cette tâche est loin d'être aisée. C'est justement sur ce calcul que portait l'extrait, cité dans l'introduction de ce chapitre, où l'astronome nous disait s'y être pris à au moins soixante-dix reprises et pour lequel il nous demandait de la compassion. Enfin, vers la fin du chapitre 16, Kepler parvient à un résultat lui permettant d'obtenir les paramètres suivants, où il n'y a effectivement pas bissection de l'excentricité : la distance entre le point équiant et le centre de l'orbite est de 7 232 unités (selon la convention, le rayon de l'orbite est établi à 100 000 unités), alors que celle entre le centre de l'orbite et le Soleil est de 11 332 unités³⁵⁰. Le premier modèle de Mars est ainsi obtenu.

³⁴⁸ KOYRÉ (1961), p. 176. Je souligne.

³⁴⁹ Cf. RIVERIN (2007), pp. 53-56.

³⁵⁰ Cf. *Opera omnia*, III, p. 250 ; *Astronomia nova*, XVI, p. 269.

Kepler propose de tester sa reconstruction avec d'autres données empiriques. Il débute au chapitre 18, avec douze observations achroniques³⁵¹ : pour les longitudes, il obtient une erreur d'environ deux minutes d'arc, ce qui est remarquable pour l'époque et correspond à peu près au degré d'incertitude que Kepler attribue aux observations de Tycho Brahe³⁵². Mais les choses se gâtent dès le chapitre suivant, que Kepler intitule : « Une **réfutation** de cette hypothèse, par les **latitudes** achroniques, construite selon **l'opinion des autorités** et **confirmée** par toutes les positions achroniques »³⁵³. Il montre effectivement que son hypothèse ne tient pas la route pour des raisons empiriques, lorsqu'elle est confrontée à l'ensemble des observations achroniques. Le problème majeur de son modèle est que, lorsqu'il mesure la distance entre le Soleil et le centre de l'orbite martienne en se servant des latitudes³⁵⁴ de Mars, il obtient une valeur de 9 943 unités, et non plus celle dictée par son modèle (11 332 unités)³⁵⁵ tel qu'établi à partir de certaines observations.

Avant de conclure que cette hypothèse est fautive et de la considérer comme réfutée, Kepler tente d'y apporter quelques amendements, et il le fait en s'inspirant des modèles concurrents (ce à quoi réfère « l'opinion des autorités » dans le titre du chapitre). D'abord, il reprend ses calculs, cette fois-ci en utilisant le Soleil moyen (comme Copernic ou Tycho Brahe), mais obtient encore une fois une erreur trop grande par rapport aux observations. Kepler remet ensuite en cause son rejet de la bissection de l'excentricité et retourne, sur ce point, du côté de Ptolémée, remarquant que ce dernier avait trouvé également des arguments observationnels pour l'appuyer : « Ce n'était donc pas pour rien qu'il [*sc.* Ptolémée] l'a fait, et cette bissection ne doit pas être rejetée par nous sans réflexion, puisque les latitudes observées l'attestent. »³⁵⁶ Or si ce retour à la bissection de l'excentricité fonctionne bien pour les latitudes, il y a un problème, cette fois-ci, du côté des longitudes, d'environ huit minutes d'arc.

³⁵¹ Les observations de Mars dites achroniques sont des observations prises au moment où Mars est en opposition par rapport à la Terre, c'est-à-dire où elle se retrouve sur une ligne droite Terre – Soleil – Mars. En d'autres mots, sa longitude diffère alors de 180° par rapport à celle de la Terre.

³⁵² Cf. *Opera omnia*, III, p. 254 ; *Astronomia nova*, XVIII, p. 276.

³⁵³ « Per **latitudines** acronychias **redargutio** hujus hypotheseos ex **auctorum sententia** constitutae et **comprobatae** per omnia loca "akronuchia". » *Opera omnia*, III, p. 255 ; *Astronomia nova*, XIX, p. 281 (ma traduction). Je souligne.

³⁵⁴ La latitude, en astronomie, correspond à la coordonnée d'une planète donnant sa position par rapport à l'écliptique.

³⁵⁵ Cf. *Opera omnia*, III, p. 257 ; *Astronomia nova*, XIX, p. 283.

³⁵⁶ « Non igitur nihil fuit quod ipsum permoverat : nec temere nobis est repudianda haec bisectio, cum de ea testentur latitudines observatae. » *Opera omnia*, III, p. 258 ; *Astronomia nova*, XIX, p. 285 (ma traduction).

C'est cette marge d'erreur qui sera jugée inacceptable par l'astronome et qui le poussera à réfuter définitivement cette hypothèse.

Ce refus d'accepter une erreur aussi petite que huit minutes d'arc est nouveau dans l'histoire de l'astronomie, et l'on doit certainement y voir l'apport de l'astronomie d'observation, beaucoup plus exacte avec Tycho Brahe. Kepler note d'ailleurs que Ptolémée ne pouvait pas descendre lui-même en deçà de dix minutes d'arc dans ses propres observations³⁵⁷. Or les observations de Tycho Brahe, avec une marge d'erreur évaluée à seulement deux minutes d'arc par Kepler, ne nous permettent plus d'accepter une discordance entre les observations et l'hypothèse qui soit supérieure à cette valeur. Mais au-delà de cette nouvelle exactitude des données, le pouvoir de réfutation que Kepler accorde aux *explananda* n'a certes pas été facile à attribuer et ne l'a d'ailleurs pas fait rejeter immédiatement son hypothèse, si difficilement érigée, sans d'abord chercher à la sauver ou, du moins, à comprendre ce qui causait problème.

Kepler conclut son chapitre 19 non pas sur une note d'échec, mais en attribuant à cet écart de huit minutes d'arc un rôle déterminant pour la poursuite de l'astronomie nouvelle. Il va de soi que cet optimisme date sans doute de la rédaction définitive³⁵⁸ où, à rebours, Kepler constate que c'est grâce à cet échec de son premier modèle qu'il a pu établir sa nouvelle astronomie. Le dernier paragraphe de ce chapitre, relatant cette étape cruciale, mérite d'être reproduit en entier étant donné son importance pour la suite :

Mais nous, à qui la bienveillance divine a accordé en Tycho-Brahé un observateur d'une extrême habileté, dont les travaux font apparaître l'erreur de 8 minutes que Ptolémée fait dans son calcul, il est légitime que nous reconnaissons et que nous utilisions avec gratitude cette **faveur de Dieu**. Nous devons donc travailler à découvrir enfin la **forme véritable** des mouvements célestes, en abandonnant toutes ces **hypothèses fictives**. C'est la voie sur laquelle, dans la mesure de mes moyens, j'invite désormais à me suivre. Car si j'avais cru devoir négliger ces 8 minutes en longitude, **j'aurais pu corriger de manière satisfaisante, en bissectant l'excentricité**, l'hypothèse calculée au chapitre XVI. Mais parce qu'aujourd'hui elles ne peuvent plus être négligées, ce sont **ces seules 8 minutes qui ouvrirent la**

³⁵⁷ Cf. *Opera omnia*, III, p. 258 ; *Astronomia nova*, XIX, p. 286.

³⁵⁸ Comme le remarque SIMON (1979), p. 320.

voie à la **complète réforme de l'astronomie**, et elles sont devenues la matière de la plus grande partie de cet ouvrage.³⁵⁹

Nous pouvons dire avec Kepler que ces huit minutes d'arc d'erreur sont une faveur divine, ou à tout le moins un bon coup du destin, mais il ne faudrait pas passer sous silence que c'est en fait la volonté de Kepler de tenir compte de cette différence, son insistance à lui donner tout le poids nécessaire, autrement dit, son exigence de chercher à obtenir absolument une confirmation *a posteriori* de son modèle, qui a joué un rôle important pour l'avancement de la nouvelle astronomie.

Le chapitre suivant apporte un dernier argument pour réfuter ce premier modèle de Mars. En utilisant d'autres observations, autres qu'achroniques, Kepler obtient un résultat encore plus étrange : non seulement la distance entre le Soleil et le centre de l'orbe est encore une fois autre que celle prévue par son modèle (11 332 unités), mais l'on obtient alors un point équant qui varie d'endroit dans le temps, donc doté d'un mouvement de libration sur la ligne des apsides. Plutôt que de calculer ce mouvement, Kepler y renonce pour des raisons fondées sur la physique :

De fait, celui-ci [*sc.* le point équant] serait totalement (si vraiment nous retenons l'autre assomption d'une orbite sidérale circulaire) pour nous en **mouvement de libration** de haut en bas sur la ligne des apsides. Et comment ce mouvement pourrait être réconcilié avec des **raisons naturelles**, je ne vois pas.³⁶⁰

Voilà une belle illustration de ce que nous avons vu au troisième chapitre de cette thèse : l'exigence d'avoir toujours un fondement physique derrière tout modèle de reconstruction des mouvements. Inutile donc de s'acharner à reconstruire les mouvements célestes en poursuivant dans une voie admettant un mouvement de libration du point équant ; Kepler ne poursuivra pas davantage ses calculs. Quant à la précision entre parenthèses, Kepler annonce ensuite

³⁵⁹ « Nobis cum divina benignitas Tychonem Brahe observatorem diligentissimum concesserit, cujus ex observatis error hujus calculi Ptolemaici 8' in Marte arguitur ; aequum est, ut grata mente hoc **Dei beneficium** et agnoscamus et excolamus. In id nempe elaboremus, ut **genuinam formam** motuum coelestium (his argumentis **fallacium suppositionum** deprehensarum suffulti) tandem indagemus. Quam viam in sequentibus ipse pro meo modulo aliis praeibo. Nam si contemnenda censissem 8' longitudinis, jam **satis correxissem (bisecta scilicet eccentricitate)** hypothesin cap. XVI. inventam. Nunc quia contemni non potuerunt, **sola igitur haec 8' viam praeiverunt ad totam astronomiam reformandam**, suntque materia magnae parti hujus operis facta. » *Opera omnia*, III, p. 258 ; *Astronomia nova*, XIX, p. 286, trad. G. Simon, dans SIMON (1979), p. 320. Je souligne.

³⁶⁰ « Nam illud omnino (siquidem alterum assumtorum de circulari orbita sideris retineremus) librandum nobis esset in linea apsidum sursum deorsum, quod quomodo cum rationibus naturalibus conciliari possit, non video. » *Opera omnia*, III, p. 262 ; *Astronomia nova*, XX, p. 293 (ma traduction). Je souligne.

(dans un commentaire évidemment ajouté après coup) que la supposition selon laquelle l'orbite est circulaire sera démolie au chapitre 44.

Kepler prendra tout de même le temps d'analyser l'échec du premier modèle de Mars. Il procède à cette opération dans le chapitre suivant, qui clôt la deuxième partie, et qui s'intitule : « Pour quelle raison une fausse hypothèse peut mener à la vérité, et jusqu'à quel point ? »³⁶¹ Ceci n'est pas sans nous rappeler ce que nous avons relevé à la section 2.3 de cette thèse, où Kepler, dans l'*Apologia* comme dans le *Mysterium cosmographicum*, remarquait que parfois, de façon fortuite, le faux pouvait engendrer le vrai. Kepler se montre ici très sévère envers son modèle, qui correspond ici à l'hypothèse et qui, à cause d'un enchaînement d'erreurs, a mené à la fausse croyance qu'elle entraînait nécessairement le vrai. Dans un langage imagé, il compare son hypothèse à une femme non respectable qui aurait été suivie fortuitement par une femme respectable (soit la vérité), cette dernière ayant été malencontreusement prise pour une de ses suivantes par les professeurs de subtilité logique, incapables de voir la différence entre les deux³⁶². Malgré son échec face à la vérification empirique, cette hypothèse ne se sera pas montrée complètement inutile : elle demeurera un outil pratique pour calculer avec précision les longitudes de Mars. Kepler y fera ensuite référence sous le terme d'*hypothesis vicaria*, hypothèse alternative ou accessoire, montrant par là qu'il ne voit plus en elle qu'un outil de calcul.

4.2. La résolution du problème du mouvement de la Terre

Les recherches de Kepler prendront un nouvel envol dans la troisième partie (chapitres 22 à 40) de l'*Astronomia nova*, où il découvrira, comme en annonce le titre, la « clef d'une astronomie plus profonde ». Dans cette partie, il laissera momentanément de côté ses recherches sur Mars mais utilisera les résultats obtenus précédemment afin d'établir avec certitude l'orbite de la Terre par rapport au Soleil (ou du Soleil par rapport à la Terre, si l'on emploie un référentiel ptoléméen). Il se penchera notamment sur un problème resté ouvert

³⁶¹ « Causa, cur falsa hypothesis verum prodat et quatenus ? » *Opera omnia*, III, p. 262 ; *Opera omnia*, XXI, p. 294 (ma traduction).

³⁶² Cf. *Opera omnia*, III, p. 265 ; *Astronomia nova*, XXI, p. 300.

dans le *Mysterium cosmographicum* et que nous avons abordé précédemment³⁶³ : la trajectoire de la Terre par rapport au Soleil (ou du Soleil par rapport à la Terre) est-elle vraiment exempte d'un point équant ? Il conclura que ce mouvement doit effectivement être doté d'un point équant, c'est-à-dire que ce mouvement est réellement non uniforme.

Il est aisé de comprendre l'importance, voire l'urgence d'obtenir cette certitude de l'orbite terrestre : comme (à l'époque) les observations sont effectuées depuis la Terre, si l'on veut s'y fier pour confirmer ou infirmer un modèle donné, il est crucial de pouvoir connaître avec certitude cette trajectoire par rapport au Soleil pour pouvoir aller de l'avant. Nous avons vu, au chapitre 1, un extrait de ce chapitre 22 où Kepler confiait avoir toujours eu le soupçon que la Terre aurait un équant, soupçon confirmé ensuite lorsqu'il se fit connaître de Tycho Brahe. À la suite de cet extrait, Kepler spécifie que Tycho Brahe lui envoya une lettre en Styrie, en 1598, l'informant que les orbites ou épicycles utilisés pour expliquer l'inégalité du mouvement (entre la Terre et le Soleil) ne semblaient pas toujours avoir la même grandeur³⁶⁴. C'est donc dire que tant les raisons physiques qu'empiriques le poussaient à douter depuis longtemps de l'uniformité du mouvement terrestre (ou solaire). Cette question sera réglée au chapitre 22 de l'*Astronomia nova* alors qu'il va étudier et comparer deux modèles : l'un sans point équant (ou encore, ce qui revient au même, en faisant coïncider le point équant avec le centre de l'excentrique comme Copernic) et l'autre, avec un point équant ne coïncidant pas avec le centre de l'excentrique. Il montrera, de façon empirique, que le premier modèle ne tient plus la route.

La façon de procéder est reconnue pour être particulièrement ingénieuse et admirable : Kepler se servira de la planète Mars comme point de repère, en utilisant des observations effectuées alors que cette planète se trouve au même endroit dans le ciel sur l'écliptique – donc des observations effectuées à différents moments correspondant à des intervalles temporels qui égalent la période martienne, soit 687 jours terrestres (ou 1,88 année terrestre), ou l'un de ses multiples. Comme les longitudes de Mars peuvent être calculées avec précision (via l'hypothèse alternative ou même via le modèle de Tycho Brahe), la tâche pourra être d'autant plus précise. Ensuite, Kepler décide de choisir des moments (toujours séparés par 687 jours terrestres ou l'un de ses multiples) où la Terre se retrouve à ses apsides (endroits qui

³⁶³ À la section 1.1 de cette thèse.

³⁶⁴ Cf. *Opera omnia*, III, p. 267-268 ; *Astronomia nova*, XXII, p. 306.

correspondent, dans un système héliocentrique, à son périhélie³⁶⁵ et à son aphélie³⁶⁶) ; il choisira finalement des observations espacées de six ans, datant du 18 mai 1585 et du 22 janvier 1591³⁶⁷, où la Terre est très près de ses deux apsides et qu'il pourra remanier légèrement pour obtenir les valeurs dont il a besoin. L'étape suivante sera de vérifier si, à ces moments où la planète Mars est posée comme immobile, les angles formés à ces deux endroits (périhélie et aphélie de la Terre) entre la planète Mars, la Terre et le Soleil sont égaux³⁶⁸. Si c'est le cas, la preuve empirique sera faite que le point équant correspond au centre de l'orbe et que le mouvement est uniforme ; sinon, il faudra alors conclure que, pour un même intervalle de temps donné, la Terre aura parcouru des distances différentes, et donc, que son mouvement n'est pas uniforme et qu'il faut introduire un point équant, ailleurs qu'au centre de l'excentrique.

Kepler arrivera à la conclusion que les deux angles sont différents. Par conséquent, il aura présenté une preuve empirique selon laquelle la Terre a réellement un mouvement non uniforme. J'écris « une » et non « la » preuve puisque, cette découverte étant à ce point innovatrice dans l'histoire de l'astronomie, plusieurs éléments de preuve seront nécessaires pour opérer définitivement un tel changement. Kepler est toutefois très heureux de trouver une confirmation de son soupçon, car il y voit l'avantage de l'uniformité des planètes : la Terre devient une planète comme les autres, avec un point équant et voyant sa vitesse se modifier selon son parcours autour du Soleil, parcours qui est, à cette étape, excentrique et (encore) circulaire.

Les chapitres suivants sont consacrés à l'établissement de la bissection de l'excentricité – dans lequel Koyré voit un relent des recherches datant de la vérification empirique de l'hypothèse alternative³⁶⁹ – et à d'autres vérifications empiriques. Parmi ces dernières, je vais en mentionner une seule, celle des chapitres 24 et 25, qui fait encore aujourd'hui la renommée de l'astronome. Elle ressemble beaucoup à la précédente en ce qu'elle requiert, encore une

³⁶⁵ Soit l'endroit où la planète est le plus près du Soleil.

³⁶⁶ Soit l'endroit où la planète est le plus loin du Soleil.

³⁶⁷ Cf. *Opera omnia*, III, p. 270 ; *Astronomia nova*, XXII, p. 310.

³⁶⁸ Cette étape précise est bien expliquée par SIMON (1979), pp. 323-324, mais elle est curieusement absente de l'analyse de KOYRÉ (1961), pp. 182-184, qui passe immédiatement à la vérification empirique du chapitre 24.

³⁶⁹ Cf. KOYRÉ (1961), p. 181. Il est effectivement possible que Kepler, ayant constaté lors de la vérification empirique de l'*hypothesis vicaria* que les observations semblaient pencher plutôt en faveur d'une bissection de l'excentricité, ait conclu qu'il fallait procéder ainsi pour l'orbite de la Terre.

fois, des observations effectuées à des intervalles de 687 jours terrestres afin d'obtenir des mesures où la planète Mars est au même endroit. À ce moment, nous sommes encore dans un paradigme où les orbites sont circulaires. Or rappelons-nous que, pour tracer un (et un seul) cercle, trois points sont suffisants. L'astuce est donc de vérifier si le cercle parcouru par la Terre coïncide avec le cercle ayant le point équinoxial en son centre ; si c'est le cas, il faut rejeter le point équinoxial.

C'est là que l'observation de la planète Mars, conjuguée avec un modèle qui nous permet de connaître ses longitudes (Kepler en a au moins deux à sa disposition, soit celui de Tycho Brahe, ou encore, l'hypothèse alternative) devient utile pour procéder à cette vérification³⁷⁰. En prenant quatre mesures de la position de la planète Terre, espacées de 687 jours chacune, on sait deux choses : d'une part, que la distance entre la planète Mars et le centre de l'orbite est constante lors de ces mesures (puisque'elle est au même endroit) ; d'autre part, que la Terre a, pendant ces trois intervalles, parcouru la même distance angulaire vue depuis le point équinoxial (qui coïncide ou non avec le centre de l'orbite, ce qui est à déterminer). L'observation permet d'obtenir directement les quatre angles entre la planète Terre et la planète Mars ; la longitude de la Terre est déterminée à partir des modèles (celui de Tycho Brahe, ou celui de l'hypothèse alternative, tous deux néanmoins imparfaits). Par trigonométrie, il est donc possible d'établir, en ces quatre endroits, le rapport entre la distance entre la Terre et le point équinoxial et la distance entre la planète Mars et le point équinoxial. Cette distance-ci étant fixe, cela signifie que, si le résultat est identique, alors la distance entre la planète Terre et le point équinoxial est constante – ce qui revient à dire que la Terre parcourt un cercle parfait centré sur le point équinoxial, point qui coïncide alors avec le centre de l'orbite et peut donc être éliminé.

Dans le chapitre 24, Kepler est méticuleux au point de procéder à la vérification de ce rapport dans les trois systèmes (copernicien, ptoléméen, et tychonien), en y apportant les amendements nécessaires. Nous pouvons constater que cette mesure n'est pas directe puisqu'elle présuppose de connaître la longitude de la Terre, qui n'est pas mesurée mais déterminée par d'autres modèles qui, bien qu'ils aient été construits en conformité avec des données empiriques, demeurent douteux. C'est au chapitre 25 que Kepler démontre que les

³⁷⁰ Pour une bonne explication de cette vérification, assortie d'un schéma qui reprend celui de Kepler, cf. SIMON (1979), pp. 325-326.

valeurs obtenues sont différentes et ce, dans les trois systèmes. Par conséquent, il faut établir un point équant pour l'orbite terrestre, point dont la distance par rapport au centre de l'orbite équivaut à peu près à la distance entre ce dernier et le Soleil, ce qui correspond approximativement à la bissection de l'excentricité.

Kepler est très satisfait d'avoir démontré que la Terre, dans son orbite légèrement excentrique par rapport au Soleil, a réellement une vitesse non uniforme. Au sujet de sa démonstration dans le premier système, il s'exprime en ces mots :

Il a donc été démontré, dans la forme copernicienne, que le centre du circuit de la Terre est à mi-distance entre le corps du Soleil et le point d'égalité de ce circuit [*i.e.* le point équant] ; c'est-à-dire, que la Terre sur son orbite s'avance de façon inégale ; qu'elle devient **lente quand elle s'éloigne du Soleil, et rapide quand elle s'en approche**. Ce qui est conforme aux **raisons physiques** et à l'**analogie avec les autres planètes**.³⁷¹

Ce n'est donc pas tant l'inégalité en tant que telle du mouvement de la Terre qui réjouit Kepler, ici, que son inégalité relativement à sa distance au Soleil. À la lumière de tout ce que nous avons vu jusqu'à présent, il est aisé de comprendre pourquoi, selon Kepler, dans un système héliocentrique circulaire légèrement excentrique par rapport au Soleil, le point équant devenait d'une importance capitale. Nous avons déjà étudié les nombreuses raisons physiques (et métaphysiques) qui font adopter le Soleil vrai comme centre du monde. À l'époque de l'*Astronomia nova*, pour accommoder les données observationnelles, il n'était plus suffisant d'accorder, comme dans le *Mysterium cosmographicum*, une certaine épaisseur aux orbites. Kepler n'avait pas le choix d'accepter un circuit excentrique ; or comment réconcilier cette excentricité avec les nombreux présupposés en faveur d'un héliocentrisme fort ?

En un sens, la solution de Kepler est de passer de l'héliocentrisme à ce que nous pourrions appeler une approche héliodynamique³⁷², où le Soleil n'est plus obligatoirement le centre géométrique de la trajectoire des planètes, mais devient la source réelle de leur mouvement – ce qui confère au Soleil un statut encore plus important et s'accorde pleinement

³⁷¹ « Demonstratum est igitur in forma Copernicana, centrum circuitus Terrae esse medio loco inter corpus Solis et punctum aequalitatis illius circuitus, hoc est Terram in sua orbita inaequaliter incedere ; tardam fieri, **ubi longe a Sole recedit, velocem, ubi appropinquat**, quod est **physicis rationibus** et **analogiae planetarum ceterorum** consentaneum. » *Opera omnia*, III, p. 277 ; *Astronomia nova*, XXV, pp. 323-324 (ma traduction). Je souligne.

³⁷² J'utilise ce mot non pas en son sens habituel, où il réfère à l'énergie solaire, mais pour qualifier un modèle selon lequel le Soleil est la source du mouvement des planètes, sans être situé nécessairement au centre précis de leur trajectoire.

avec les « raisons physiques » évoquées depuis son *primum opus*. Quant à l'« analogie avec les autres planètes » évoquée dans le passage ci-haut, il ne faut pas comprendre ici un procédé d'analogie en tant que tel mais plutôt le fait que la Terre devient, avec l'introduction d'un point équant, une planète comme les autres, ayant une variation de mouvement en relation avec sa distance au Soleil. Cette idée est exprimée plus loin dans un passage que nous avons reproduit dans le premier chapitre de cette thèse, alors que Kepler renvoie au *Mysterium cosmographicum* pour dire que la cause de l'équant ptoléméen qu'il y proposait doit être acceptée comme « juste et légitime » puisqu'elle est « universelle et commune à toutes les planètes »³⁷³. Il n'y a donc plus d'exception au pouvoir moteur du Soleil et un tel modèle héliodynamique ne s'en trouve que davantage envisageable. Quant à la distinction traditionnelle entre physique céleste et physique terrestre, elle se retrouve de plus en plus inutile : une physique universelle devient de plus en plus envisageable.

Kepler, fort satisfait de cette trouvaille, n'en reste toutefois pas là : les six chapitres suivants se poursuivent avec d'autres vérifications empiriques (en procédant parfois à l'inverse, en établissant la trajectoire de Mars), toujours en utilisant les outils de la trigonométrie pour traiter les observations et les données fournies par les calculs fondés sur des modèles antérieurs. C'est seulement à partir du chapitre 32 que, armé de la certitude que toutes les planètes ont une trajectoire inégale régie par le Soleil, l'astronome se penche alors sur cet héliodynamisme en tant que tel. Et c'est en recherchant la nature et le fonctionnement de cette faculté reliée au Soleil qu'il fera l'une des découvertes cruciales pour l'astronomie nouvelle : la formulation de la loi des aires, que les scientifiques ont retenue comme étant la « seconde loi de Kepler ».

4.3. La loi des aires

Avant d'en arriver à sa forme finale (« le segment qui relie une planète au Soleil balaie des aires égales en temps égaux »), la loi des aires est énoncée sous plusieurs formes successives. Nous pouvons en voir une forme primitive dès le *Mysterium cosmographicum*,

³⁷³ *Opera omnia*, III, p. 298 ; *Astronomia nova*, XXXII, p. 373. Cette citation a été analysée à la section 1.1 de cette thèse.

dans le même chapitre où Kepler relevait le problème de l'absence d'équant pour la Terre³⁷⁴, soit le chapitre 22, qui s'intitule ainsi : « Pourquoi une planète se meut uniformément autour du centre de son équant »³⁷⁵, ce qui correspond à la troisième des questions cosmographiques³⁷⁶ qui, nous nous en rappelons, allait comme suit: « Pourquoi les planètes se déplacent-elles à ces vitesses ? » On voit tout de suite que le fait de se poser cette question du « pourquoi », et non simplement du « comment », incitait Kepler à orienter ses recherches vers la source du mouvement, et éventuellement à s'intéresser au rôle du Soleil et, ce faisant, au paramètre de la distance entre la planète et le Soleil. Comme quoi les questions cosmographiques permettaient, sans leur apporter nécessairement de réponses, de poser des questions qui allaient se révéler fécondes pour le développement de l'astronomie.

Dans ce chapitre 22 du *Mysterium cosmographicum*, l'astronome se penche sur la question du point équant (qu'il veut réintroduire dans son modèle héliocentrique pour remplacer les épicycles de Copernic) et, en vertu de son réalisme, il croit que les planètes se déplacent réellement avec des vitesses variables qui, du point de vue de l'équant, apparaissent comme des vitesses constantes. Constatant que le point équant devait être placé en ligne droite avec le centre de l'orbe et le Soleil vrai, Kepler s'exprime alors en ces mots :

Il faut donc admettre que le **monde entier est rempli d'une âme qui entraîne tout ce dont elle peut s'emparer**, planètes ou comètes, et qu'elle le fait **avec la vitesse requise par la distance du lieu du Soleil et par la vigueur de la force en ce lieu**. Ensuite, il faut admettre dans chaque planète une âme particulière qui, par son mouvement, fait monter la planète dans sa course, et [enfin], que l'on obtiendra des mêmes résultats, mêmes si les orbes solides sont abandonnés.³⁷⁷

La fin de cet extrait n'est là que pour nous dire que, selon ce modèle, les orbes ne sont plus nécessaires ; or Kepler a déjà noté, dans ce même chapitre, que c'est là « l'opinion du noble et très excellent mathématicien danois, Tycho Brahé »³⁷⁸ et il va éventuellement adopter cette

³⁷⁴ Ce problème a été analysé à la section 1.1 de cette thèse.

³⁷⁵ « Planeta cur super aequantis centro aequaliter moveatur. » *Opera omnia*, I, p. 181 ; *Le secret du monde*, XXII, trad. A. Segonds, p. 183.

³⁷⁶ Questions présentées à la section 1.2 de cette thèse.

³⁷⁷ « Nemp **mundus totus anima plenus esto, quae rapiat, quiequid adipscitur** stellarum sive cometarum, idque ea pernicitate, quam **requirit loci a Sole distantia et ibi fortitudo virtutis**. Deinde esto in quolibet planeta peculiaris anima, cujus remigio stella ascendat in suo ambitu : et orbibus remotis eadem sequentur. » *Opera omnia*, I, p. 183 ; *Le secret du monde*, XXII, trad. A. Segonds, pp. 185-186. Je souligne.

³⁷⁸ « sententia [...] nobilem et excellentissimum mathematicum Tychonem Brahe » *Opera omnia*, I, p. 182 ; *Le secret du monde*, XXII, trad. A. Segonds, p. 184.

position³⁷⁹. Quant à ce passage, il peut être interprété comme la première occurrence, chez Kepler, de l'idée selon laquelle il existe une relation entre la vitesse d'une planète et sa distance au Soleil. Selon cette forme primitive, c'est l'âme du monde, ce principe qui anime le monde dans sa totalité, qui fait en sorte que les planètes se meuvent, et ce, en fonction de leur distance au Soleil. Il y a certes un volet empirique à cette affirmation selon laquelle la distance d'une planète au Soleil est un paramètre important et pertinent pour en déterminer la vitesse. Mais au lieu d'en rester là, Kepler, parce qu'il s'intéresse à la cause des mouvements (le « pourquoi ») en tant que cosmographe, parle du Soleil comme de la « source de l'âme motrice »³⁸⁰. Cela est tout à fait en accord avec ce qu'il écrit deux chapitres auparavant, alors qu'il affirme que cette « âme du monde » revient au Soleil³⁸¹ en vertu de sa dignité et de sa supériorité par rapport aux autres astres. Raisons empiriques et raisons théoriques concordent encore une fois, lui donnant la confiance qu'il est sur la bonne voie.

À noter que c'est bien pour des raisons *a priori* que Kepler préfère envisager une seule âme motrice, située dans le Soleil, plutôt que plusieurs âmes motrices, situées dans les planètes, qui dans ce deuxième cas diminueraient en force selon leur distance au Soleil. Même si ces deux modèles coïncideraient quant à leurs résultats empiriques, Kepler soutient que c'est la première option qui est la bonne, étant donné l'analogie Dieu~Soleil, mais aussi parce que nous pouvons développer cette analogie en comparant la force motrice à la lumière, qui se répand depuis le Soleil aux planètes³⁸². Les éléments du monde sont toutefois également dotés d'âmes particulières: les planètes, ainsi, peuvent « connaître » leurs trajectoires et les ajuster en conséquence, en conformité avec ce qui est dicté par l'âme du monde.

Dans l'*Astronomia nova*, la même idée est utilisée mais les termes employés sont différents. Kepler ne parle plus d'âme du monde ni d'âme motrice mais plutôt d'une vertu motrice (< *virtus motrix* >) se transmettant via la *species*³⁸³ du Soleil. Il relève lui-même ce

³⁷⁹ Nous avons vu à la section 1.4 de cette thèse que dans le *Mysterium cosmographicum*, les orbes, s'ils sont présents en tant que sphères tangentes aux cinq polyèdres réguliers tenant lieu d'archétypes mathématiques, ne sont pas matériels.

³⁸⁰ « fons animae moventis » *Opera omnia*, I, p. 182.

³⁸¹ Cf. *Opera omnia*, I, p. 174 ; *Le secret du monde*, XX, trad. A. Segonds, p. 169. Cette citation a été étudiée à la section 1.3 de cette thèse.

³⁸² Cette image se retrouve dans le même passage. Cf. *Opera omnia*, I, p. 174 ; *Le secret du monde*, XX, trad. A. Segonds, p. 169

³⁸³ Ce mot, après avoir connu plusieurs traductions différentes (« image », « apparence », « émanation », « forme », etc.) est maintenant généralement laissé en latin par les traducteurs et commentateurs. Pour une

remplacement dans une note à la seconde édition du *Mysterium cosmographicum*, alors qu'il commente le passage reproduit ci-haut concernant l'âme du monde :

Là encore, à la place d'âme, il faut entendre la *species* immatérielle du Soleil, qui est étendue comme la lumière : ainsi tu auras, en peu de mots, ici, l'essentiel de ma physique céleste, telle qu'elle est enseignée dans mes *Commentaires sur Mars*, parties III et IV [...].³⁸⁴

Quant aux âmes particulières des planètes, elles seront remplacées par des « intelligences » dotées peut-être d'une *vis insita* les incitant à résister au pouvoir moteur de la *species* du Soleil, ce qui expliquera pourquoi elles ralentissent lorsqu'elles s'en éloignent.

Nous le voyons bien, cette première forme de la seconde loi de Kepler ne fait pas encore référence à un calcul précis, de nature mathématique. À première vue, il semble aller de soi que si le monde a été construit selon des archétypes mathématiques, tel qu'énoncé dans le *Mysterium cosmographicum*, il serait surprenant que l'âme du monde ne suive pas une forme de régularité mathématique lorsqu'elle meut les planètes. La question se pose : pourquoi Kepler n'a-t-il pas proposé, dans ce chapitre 22 du *Mysterium cosmographicum*, une forme de loi mathématique du mouvement ? La réponse se trouve probablement dans les deux remarques suivantes. Tout d'abord, Kepler n'ayant pas encore établi qu'il y avait un point équatorial pour la Terre (bien qu'il en ait eu le soupçon), une telle loi n'aurait pas été valide pour cette planète. Ensuite, à cette époque, Kepler en est encore à une vision statique du monde : la géométrie est là pour nous donner la forme (spatiale) du monde, forme pouvant être dictée de façon légitime par les cinq polyèdres réguliers à l'intérieur desquels les planètes se déplacent. Il aura besoin éventuellement du concept d'harmonie pour envisager une conception dynamique de l'ordre du monde, formé non pas selon des archétypes géométriques mais harmoniques. Selon cette conception dynamique, les planètes déploient leurs chants individuels dans le temps, selon leurs vitesses variantes (produisant des notes aiguës ou graves selon qu'elles sont rapides ou lentes), créant ainsi un chœur planétaire harmonieux.

analyse de la signification de ce mot et un recensement de ses différentes traductions, voir sa définition dans le glossaire établi par Donahue dans KEPLER ([1609] 1992), pp. 23-24.

³⁸⁴ « Rursum pro anima intellige Solis speciem immateriatam, extensam ut lumen, et habebis hic brevibus verbis summam meae physicae coelestis, traditam in Comment. Martis part. III. et IV. [...]. » *Opera omnia*, I, p. 183 ; *Le secret du monde*, XXII, note 5, trad. A. Segonds, p. 187.

L'astronome explique ce changement important en 1619 dans son *Harmonice mundi*, comparant sa quête initiale à celle de pierres inertes, par opposition à une statue animée :

Bien entendu, je ne cherchais dans cette maison du Monde rien d'autre que des pierres, de forme très élégantes, mais ignorant ce qui conviendrait à ces pierres ; l'Architecte les a modelées à l'image très articulée d'un corps animé. Ainsi peu à peu, surtout dans ces trois dernières années, j'en suis venu aux Harmonies [...] ; c'est-à-dire qu'elles procuraient le nez, les yeux et les membres restants à la statue à laquelle les figures avaient prescrit la seule quantité externe de masse brute.³⁸⁵

Au cours du processus menant à cette conception dynamique des archétypes mathématiques, la seconde loi jouera un rôle important car elle permettra d'inclure, pour la première fois, un paramètre temporel dans la description d'un mouvement des planètes qui, bien que réellement non uniforme, n'en est pas moins ordonné, ou harmonieux.

La relation des distances

À l'époque de l'*Astronomia nova*, Kepler n'en est pas encore aux archétypes harmoniques mais il s'intéresse plus en détail à cette force motrice émanant du Soleil, cherchant à démystifier sa nature et la façon dont elle se diffuse. Une première proposition d'une règle mathématique proposant un lien entre la vitesse d'une planète et sa distance au Soleil apparaît au chapitre 32, intitulé « La vertu qui meut la planète sur un cercle diminue avec l'éloignement de sa source »³⁸⁶. Nous y retrouvons ce qui a été appelé par les commentateurs la « loi des distances »³⁸⁷ ; pour ma part, à cette étape de l'*Astronomia nova*, je préfère parler de simple « relation » puisque Kepler sait qu'elle n'est pas valide en tous les endroits de la trajectoire, ce qu'il précise lorsqu'il l'énonce. Nous pouvons voir dans cette énonciation une seconde³⁸⁸ forme ou stade de la loi des aires :

³⁸⁵ « Scilicet in hac mundi domo quaerebam nil nisi saxa, formae elegantioris, sed quae saxis conveniret, ignarus, Architectum illa finxisse in articulatissimam effigiem animati corporis. Ita paulatim, his praesertim ultimis 3 annis, ventum ad harmonias [...] ; illae scilicet nasum, oculos et reliqua membra conciliabant statuae, cui istae solam externam rudis massae quantitatem praescripserant. » *Opera Omnia*, V, p. 322 ; *Harmonice mundi*, V (ma traduction).

³⁸⁶ « Virtutem, quae planetam movet in circulum, attenuari cum discessu a fonte. » *Opera omnia*, III, p. 297 ; *Astronomia nova*, XXXII, p. 372 (ma traduction).

³⁸⁷ Cf. STEPHENSON (1987), p.20 et MARTENS (2000), p. 85.

³⁸⁸ La première étant, bien sûr, celle proposée dans le chapitre 22 du *Mysterium cosmographicum*.

dans toutes les hypothèses construites selon la forme ptoléméenne, quelle que soit la grandeur de l'excentricité, la vitesse au périhélie et la lenteur à l'aphélie sont, de très près, proportionnelles aux lignes tracées du centre du monde à la planète.³⁸⁹

Notons que, dans ce chapitre 32 (et les suivants), comme l'annonce Kepler dans le paragraphe précédent, la « planète » fait référence soit à la Terre, dans le modèle de Copernic, ou au Soleil, dans le modèle mixte de Tycho Brahe. Kepler ne traite donc pas ici de la planète Mars, ce qui est conforme aux objectifs de la partie III, qui se penche sur la résolution du mouvement de la Terre par rapport au Soleil (ou vice versa). Quant à la « forme ptoléméenne », elle ne renvoie pas au géocentrisme comme tel, mais indique plutôt que ces deux modèles sont construits ainsi : orbites circulaires et excentriques par rapport au centre du monde, auxquels on introduit un point équant. Les trois points utilisés dans ces modèles (point équant, centre de l'excentrique et centre du monde) sont alignés, et la ligne qui les traverse rejoint également les deux apsides (périhélie et aphélie pour le modèle copernicien, périégée³⁹⁰ et apogée³⁹¹ pour le modèle tychonien).

Si l'on reprend cette formule, nous obtenons cette relation pour un modèle copernicien : lorsque la Terre est le plus près du Soleil, sa vitesse atteint son maximum, tandis que lorsqu'elle est le plus loin du Soleil, sa vitesse est au plus bas, et le rapport entre les vitesses est égal au rapport inverse des distances entre la Terre et le Soleil en ces deux endroits³⁹². Dans le cas du modèle tychonien, il suffit d'invertir, dans la phrase précédente, les termes « Terre » et « Soleil ». Nous pourrions symboliser cette relation des distances ainsi : $v_p / v_a = d_a / d_p$ (où v : vitesse angulaire d'une planète depuis le centre de l'excentrique, d : distance de cette planète au centre du monde). Dans le cas d'un modèle héliocentrique, la planète est la Terre, le centre du monde est le Soleil et a et p réfèrent respectivement aux positions à l'aphélie et au périhélie ; dans un modèle géocentrique, la planète est le Soleil, le centre du monde est la Terre et a et p réfèrent respectivement aux positions à l'apogée et au périégée.

³⁸⁹ « in omni hypothesi Ptolemaica hac forma instructa, quantacunque eccentricitas fuerit, celeritatem in perihelio et tardinatem in aphelio proportionari quam proxime lineis ex centro mundi eductis in planetam. » *Opera omnia*, III, p. 298 ; *Astronomia nova*, XXXII, p. 373 (ma traduction).

³⁹⁰ Soit l'endroit où la planète (ici, le Soleil) est le plus près de la Terre.

³⁹¹ Soit l'endroit où la planète (ici, le Soleil) est le plus loin de la Terre.

³⁹² Il est à noter que cette relation des distances, quantifiée de cette façon, est fautive. Néanmoins, la loi des aires qui allait s'en inspirer se révéla exacte.

Kepler n'a pas besoin d'utiliser de nouvelles observations pour démontrer cette relation : il s'agit simplement de montrer qu'il en va ainsi dans un modèle avec équant, lequel a été corroboré pour le mouvement de la Terre par rapport au Soleil grâce notamment à des observations et aux techniques ingénieuses exposées plus haut. Il est important de noter que Kepler ne dispose pas des outils du calcul infinitésimal et, comme nous l'avons vu précédemment³⁹³, il ne conceptualise pas les vitesses instantanées. En effet, ces dernières sont impossibles à représenter géométriquement, impossibilité qui est prescrite par Euclide et par l'exigence d'obtenir des archétypes géométriques. Par conséquent, dans la démonstration qui suit l'énonciation de cette relation des distances, Kepler procède plutôt en mesurant le temps nécessaire à la planète pour traverser un même (petit) arc de cercle. Il conclura que, près des apsides, ces intervalles de temps sont proportionnels aux distances entre la planète et le centre du monde³⁹⁴ : autrement dit, plus la planète est éloignée du Soleil, plus elle met du temps pour parcourir une même distance sur son arc. Cette relation peut se formuler ainsi : $t_p / t_a = d_p / d_a$ (où t : intervalle de temps utilisé par la planète pour traverser un même arc de cercle, d : distance de cette planète au centre du monde). Néanmoins, Kepler remarque que cette relation n'est valide que pour les valeurs s'approchant très près des apsides (périhélie et aphélie ou périégée et apogée) ; lorsqu'il tente de généraliser cette relation pour le reste de l'orbite (soit pour tout d), les positions obtenues par son modèle et cette relation ne sont plus les mêmes.

La démonstration d'un pouvoir moteur situé dans le Soleil

Cette relation, même si elle ne peut faire office de loi, fournit un argument de taille pour Kepler lorsqu'il veut procéder à la démonstration du chapitre suivant, dont la conclusion est énoncée dans son titre : « Le pouvoir qui meut les planètes réside dans le corps du Soleil »³⁹⁵. Pour en arriver à cette conclusion, Kepler utilise alors les principes de la philosophie, remarquant que si v et d sont mises en corrélation, soit l'une est la cause de l'autre (ce qui nous donne deux options), soit, troisième option, elles ont toutes deux une cause commune :

³⁹³ À la section 3.3 de cette thèse.

³⁹⁴ Cf. *Opera omnia*, II, p. 299 ; *Astronomia nova*, XXXII, p. 375.

³⁹⁵ « Virtutem, quae planetas movet, residere in corpore Solis. » *Opera omnia*, III, p. 300 ; *Astronomia nova*, XXXIII, p. 376 (ma traduction).

Puisque c'est un axiome très utilisé à travers la philosophie naturelle universelle : que parmi les choses qui surviennent en même temps et de la même façon, et qui reçoivent partout les mêmes dimensions, ou bien l'une est la cause de l'autre, ou bien les deux sont l'effet de la même cause ; comme ici, l'intensité et affaiblissement du mouvement coïncide continuellement en proportion avec l'approchement et l'éloignement depuis le centre du monde. C'est pourquoi, soit cet affaiblissement sera la cause de l'éloignement de l'étoile à partir du centre du monde, soit l'éloignement [sera la cause] de l'affaiblissement, ou soit les deux auront une quelque cause en commun.³⁹⁶

La première option, selon laquelle d est causée par v , est rejetée ensuite parce qu'elle n'est « pas conforme à la nature »³⁹⁷ : impossible que la distance d'une planète au centre du monde soit causée uniquement par la vigueur de son mouvement longitudinal. C'est plutôt l'inverse qu'il faut envisager, « car la distance à partir du centre **est antérieure en pensée et en nature** au mouvement sur un intervalle »³⁹⁸. La primauté de la distance sur le mouvement est justifiée ainsi pour des raisons naturelles, mais aussi pour des raisons conceptuelles: alors que la distance au centre d'une planète peut se concevoir sans son mouvement, le mouvement d'une planète n'est pas indépendant de sa distance au centre, dont il a besoin pour surgir (car sans espace, point de mouvement). Par conséquent, la distance au centre du monde est bien la cause de l'intensité du mouvement et c'est donc la deuxième option qui est retenue : v est causée par d .

Une fois établi que c'est la distance entre la planète et le centre du monde qui est la cause de l'intensité du mouvement de la planète, il ne reste que deux prémisses à justifier pour en arriver à conclure logiquement que le Soleil est la cause du mouvement : d'abord, que c'est le centre du monde, et non la planète, qui cause le mouvement ; ensuite, c'est le Soleil, et non la Terre ou un point fictif, qui se situe au centre du monde.

³⁹⁶ « Est siquidem usitatissimum axioma per universam philosophiam naturalem : eorum, quae simul et eodem modo fiunt et easdem ubique dimensiones accipiunt, alterum alterius causam aut utrumque ejusdem causae effectum esse ; ut hic intentio et remissio motus cum accessu et recessu a centro mundi in proportione perpetuo coincidunt. Quare vel debilitatio ista erit cause discessionis sideris a centro mundi, vel discessio debilitationis, vel utriusque erit aliqua causa communis. » *Opera omnia*, III, p. 300 ; *Astronomia nova*, XXXIII, p. 376 (ma traduction).

³⁹⁷ « neque est naturae consentaneum » *Idem*.

³⁹⁸ « Distantia enim a centro **prior est cogitatione et natura** quam motus in longum. » *Opera omnia*, III, p. 300 ; *Astronomia nova*, XXXIII, p. 377 (ma traduction). Je souligne.

En ce qui concerne la première de ces deux prémisses, nous retrouvons un peu le même questionnement au chapitre 22 du *Mysterium cosmographicum*, alors que Kepler se demandait s'il y avait une seule âme motrice, dans le Soleil, ou plusieurs âmes motrices, dans les planètes qui lui tournent autour ; rappelons-nous que c'était par analogie avec la lumière que Kepler concluait qu'il y avait une seule âme motrice, dans le Soleil. Dans le chapitre 33 de l'*Astronomia nova*, Kepler s'y prend différemment. Il évoque tout d'abord la possibilité qu'il y ait une « force animale » (< *vis animalis* >) située dans les planètes, possibilité qu'il rejette sous prétexte qu'une âme exerçant une telle force fournirait des efforts (en accélérant puis ralentissant la planète) de façon continue, sans se fatiguer, ce qui est jugé « absurde »³⁹⁹. Kepler ajoute un autre argument : puisqu'il n'y a pas d'orbites solides, tel que prouvé par Tycho Brahe, il devient impossible de comprendre comment une telle force pourrait guider une planète qui, contrairement aux oiseaux qui volent dans l'atmosphère, n'a pas d'organes sensitifs pour se repérer⁴⁰⁰. De tout cela, Kepler en conclut que la cause de la variation de mouvement des planètes se retrouve plutôt dans le centre du monde.

Ne reste plus qu'à démontrer la deuxième de ces prémisses, à savoir, que c'est le Soleil qui est au centre du monde. Pour ce faire, Kepler fera référence à plusieurs arguments *a posteriori*. En premier lieu, il fait référence à ce qui a été démontré au chapitre 32, soit la relation des distances, en tant qu'« argument probable » (< *argumentum probabile* >)⁴⁰¹ pour rejeter, *a posteriori*, l'utilisation d'un point fictif comme centre du monde. Rappelons que ce recours à la relation des distances avait également joué un rôle dans la justification de l'assertion selon laquelle la distance d'une planète au centre du monde est la cause de la variation du mouvement de cette planète, assertion ayant permis à son tour de justifier l'affirmation selon laquelle il y a un pouvoir moteur situé soit dans la planète, soit dans le centre du monde. Ensuite, Kepler revient sur un élément apporté dans les chapitres antérieurs de l'*Astronomia nova*⁴⁰², alors qu'il établissait que certains phénomènes nocturnes ne trouvaient leur explication que si l'on calculait les oppositions de Mars par rapport au Soleil vrai (et non par rapport au Soleil moyen) ; autrement dit, la Terre et la planète Mars semblent toutes deux être régies par le Soleil. Néanmoins, ces deux arguments ne sont pas encore à

³⁹⁹ *Idem.*

⁴⁰⁰ *Idem.*

⁴⁰¹ *Opera omnia*, III, p. 301 ; *Astronomia nova*, XXXIII, p. 378.

⁴⁰² Nous n'avons pas vu en détail cet élément, mais il ne me semble pas essentiel pour cette étude.

recevoir comme des preuves irréfutables, loin de là : « Mais de ces deux arguments, l'un dépend d'une probabilité physique, et l'autre procède du possible à l'être »⁴⁰³, c'est-à-dire que le deuxième argument est en voie d'être démontré. Kepler apporte un troisième argument, toujours en grande partie empirique : il relève qu'il est impossible d'éviter de construire la trajectoire de Mars par rapport au Soleil vrai, sinon on obtient un modèle qui n'est pas en accord avec le parallaxe annuel que nous observons. En ce qui concerne ce dernier argument, Kepler nous dit toutefois que la preuve est présentée au chapitre 52, et qu'une preuve similaire se retrouve également plus loin⁴⁰⁴. Les arguments *a posteriori* nous suggèrent donc que le Soleil est au centre du monde, point de référence à partir duquel on peut construire les trajectoires de la Terre et de la planète Mars.

Les prémisses (dont la plupart ont un volet empirique à leur justification) sont donc suffisantes pour que l'on puisse conclure qu'il y a un pouvoir moteur situé dans le Soleil : le Soleil est au centre du monde, le pouvoir moteur est au centre du monde, donc le pouvoir moteur est dans le Soleil. Comme le résume Kepler : « Donc, avec le Soleil correspondant au centre du système, la source du pouvoir moteur, à partir de ce qui a été déjà démontré, correspond au Soleil, puisqu'il a été localisé aussi au centre lui-même du monde. »⁴⁰⁵

C'est à ce moment, après cette longue démonstration procédant à partir de prémisses qui ont été établies de façon empirique, que Kepler revient sur ses arguments *a priori*, dans ce passage que nous avons évoqué précédemment⁴⁰⁶ et qui mérite d'être retranscrit ici :

Assurément, si cela, que j'ai démontré à l'instant *a posteriori* (à partir des observations) par une déduction plutôt longue, si cela, dis-je, je l'avais pris comme devant être démontré *a priori* (à partir de la dignité et de la supériorité du Soleil) [...]; je pense que j'aurais mérité d'être entendu par une oreille aussi favorable.⁴⁰⁷

J'insiste particulièrement sur cette section de l'*Astronomia nova* puisqu'elle me semble contenir des éléments particulièrement essentiels pour comprendre le cheminement intellectuel

⁴⁰³ « Sed horum duorum argumentorum alterum nititur probabilitate physica, alterum procedit a posse ad esse. » *Opera omnia*, III, p. 301 ; *Astronomia nova*, XXXIII, p. 378 (ma traduction).

⁴⁰⁴ Cf. *Opera omnia*, III, p. 301 ; *Astronomia nova*, XXXIII, pp. 378-379.

⁴⁰⁵ « Sole igitur in centrum systematis competente, fons virtutis motricis ex jam demonstratis in Solem competent, cum et ipse in centro mundi jam modo repertus sit. » *Opera omnia*, III, p. 301 ; *Astronomia nova*, XXXIII, p. 379 (ma traduction).

⁴⁰⁶ À la section 2.2 de cette thèse.

⁴⁰⁷ « Sane si hoc ipsum, quod jam a posteriori (ex observationibus) per longiusculam deductionem demonstravi, si hoc, inquam, a priori (ex dignitate et praestantia Soli) demonstrandum suscepissem, [...]; puto me aequis auribus audiri meruisse. » *Opera omnia*, III, p. 301 ; *Astronomia nova*, XXXIII, p. 379 (ma traduction).

de Kepler. Nous avons vu jusqu'à présent comment Kepler a pu justifier, à partir des observations, l'assertion selon laquelle il y a une force motrice dans le Soleil. Les nouvelles observations de Tycho Brahe, qui permettaient de conclure qu'il fallait introduire un point équiant dans le mouvement relatif de la Terre par rapport au Soleil (si l'on adoptait un modèle à trajectoire circulaire excentrique) ont certainement été essentielles pour justifier de façon empirique cette assertion. Mais ce serait un abus de langage que de dire que ce sont seulement les observations qui ont permis à Kepler d'en arriver à cette conclusion, dont l'idée était déjà présente dès le *Mysterium comographicum*, en utilisant un vocabulaire légèrement différent (âme motrice). Cette idée était alors justifiée par des présupposés métaphysiques, en vertu de la dignité du Soleil, alors que les observations de l'époque la réfutaient. Ce soupçon, qui n'avait jamais quitté Kepler, a certainement joué un rôle dans la décision de se pencher sur la variable d (distance entre la planète et le centre du monde, l'un des deux éléments étant le Soleil, peu importe le système envisagé) et sa relation avec la vitesse v (envisagée par Kepler selon les intervalles temporels pour une même distance orbitale, qui sont plus ou moins grands selon que la vitesse est lente ou rapide). Autrement dit, les raisons *a priori* ont certainement guidé le chercheur dans ses recherches empiriques ; quant aux résultats de ces recherches, comme ils étaient conformes à ce qui avait été démontré *a priori*, ils ne s'en trouvent que confirmés davantage, renforçant la confiance du chercheur envers ces derniers. Il me semble fort révélateur de voir que, dans ce passage, Kepler rappelle ces raisons *a priori* en affirmant qu'elles méritent une écoute de même qualité que celle accordée aux raisons *a posteriori*.

Nous voyons également, dans cette section de l'*Astronomia nova*, certaines applications concrètes de l'astronomie nouvelle⁴⁰⁸ que Kepler cherche à construire. En se posant la question du « pourquoi », en concevant que l'astronomie doit être fondée sur les causes, Kepler va au-delà de la simple relation des distances ; il se penche ainsi sur la vertu motrice solaire comme telle et c'est en se questionnant sur la nature et le fonctionnement de ce pouvoir qu'il va, entre autres, en arriver à la loi des aires.

⁴⁰⁸ Astronomie nouvelle dont les caractéristiques ont été extraites dans les chapitres précédents de cette thèse.

*La nature de la vertu motrice*⁴⁰⁹

L'examen de la nature de ce pouvoir moteur est entamé tout de suite après cette démonstration, toujours dans ce chapitre 33. Kepler formule d'emblée une objection à cette localisation du pouvoir moteur dans le Soleil : contrairement aux autres planètes, le mouvement de la Lune, lui, semble nettement régi par la Terre⁴¹⁰. Kepler annonce toutefois qu'il montrera au chapitre 37 que ce pouvoir moteur pourra être, dans ce cas, situé dans la Terre, mais qu'il s'étendra tout de même jusqu'au Soleil.

Une fois cette objection momentanément écartée, Kepler se demande si le pouvoir moteur du Soleil peut s'apparenter à la lumière qu'il diffuse. L'astronome n'apporte pas ici d'arguments *a priori* en faveur de cette analogie, mais nous pouvons nous rappeler les propos du *Mysterium cosmographicum* où le Soleil était valorisé en vertu de « la splendeur de sa lumière »⁴¹¹. Il y a donc de bonnes chances de croire que le pouvoir moteur qui est situé en lui se comporte comme la lumière. Il faut écrire « se comporte comme » et non pas « s'identifie à » car, comme le remarque bien Koyré, il s'agit bel et bien d'un lien de similitude entre les deux et non d'identité. Jamais la lumière comme telle ne pourrait être la vertu motrice en elle-même – cela n'est pas explicitement argumenté mais semble aller de soi, ne serait-ce que parce que, à l'époque, on attribue à la lumière une vitesse infinie – mais il se pourrait bien que la première soit le véhicule de transmission de la seconde : « Et quoique cette lumière du Soleil ne puisse pas être le pouvoir moteur lui-même, que cependant les autres voient si la lumière a peut-être la valeur d'une sorte d'instrument ou de véhicule, dont le pouvoir moteur se sert. »⁴¹² Cette option sera toutefois menacée par deux objections *a posteriori*. La première a trait aux occultations subies par les planètes : lorsqu'une planète subit une occultation, c'est-à-dire lorsqu'elle est éclipsée par une autre planète qui lui bloque la lumière du Soleil, elle ne cesse pas son mouvement pour autant ; la vertu motrice se transmet donc tout de même malgré le fait que la lumière se trouve arrêtée par un corps opaque. La seconde objection va comme

⁴⁰⁹ Je traduis « virtus motrix » par « vertu motrice » ou « pouvoir moteur ».

⁴¹⁰ Cf. *Opera omnia*, III, p. 302 ; *Astronomia nova*, XXXIII, p. 380.

⁴¹¹ *Opera omnia*, I, p. 174 ; *Le secret du monde*, XX, trad. A. Segonds, p. 169. Passage étudié à la section 1.3 de cette thèse.

⁴¹² « Et quamvis haec Solis lux virtus ipsa movens esse nequeat, videant tamen alii, utrum sese habeat lux instar instrumenti aut vehiculi fortasse cujusdam, quo virtus movens utatur. » *Opera omnia*, III, p. 302 ; *Astronomia nova*, XXXIII, p. 380 (ma traduction).

suit : la vertu motrice se propage de façon rectiligne, en cercle, alors que la lumière se propage de façon surfacique, en sphère⁴¹³. Par conséquent, la première se diffuse en fonction de la distance, alors que la seconde le fait en fonction du carré de la distance.

Nous avons vu⁴¹⁴ que Kepler proposerait ensuite une analogie magnétique qui, elle, permettrait d'éviter ces deux objections. Néanmoins, nous faisons également la remarque selon laquelle Kepler ne renonce pas à son analogie avec la lumière pour autant. De fait, tout juste après avoir énoncé ces deux objections, Kepler annonce que « nous pourrions peut-être répondre à ces objections dans les chapitres immédiats suivants »⁴¹⁵. Ces réponses aux objections, que ce soit celles des chapitres immédiats ou celles exposées ultérieurement dans le chapitre 57, ne seront toutefois pas très convaincantes. Alors que Koyré parle d'ailleurs d'un raisonnement qui n'est « pas très fort »⁴¹⁶ et que ses stratégies auront plutôt l'effet inverse, soit de confirmer la seconde objection, Simon remarque qu'il faudra attendre son *Epitome astronomiae copernicanae* (1617-1621) pour que Kepler puisse trouver « une explication sinon exacte, puisque sa loi est fautive, du moins rationnellement rigoureuse à ses propres yeux »⁴¹⁷.

Cela dit, malgré ses limites, l'analogie avec la lumière lui permettra d'en dire davantage sur la nature de cette vertu motrice : tout comme la lumière, la vertu motrice est une *species* immatérielle. Cela donnera à Kepler les outils conceptuels pour rendre compte du fait que, malgré sa nature immatérielle, ce pouvoir moteur, en tant qu'entité physique, demeure quantifiable. Car l'astronome voit là une objection potentielle : puisqu'il est immatériel, le pouvoir moteur ne semble pas pouvoir être sujet à la géométrisation ; or la géométrisation est, nous l'avons vu, une condition essentielle de toute entité physique selon Kepler. Ce dernier répond à cette objection de la façon suivante :

Bien que la vertu motrice ne soit pas quelque chose de matériel, puisqu'elle est cependant **destinée à transporter la matière**, à savoir, le corps des planètes, elle

⁴¹³ Cf. *Opera omnia*, III, p. 302 ; *Astronomia nova*, XXXIII, pp. 380-381.

⁴¹⁴ À la section 3.4 de cette thèse.

⁴¹⁵ « respondere fortasse poterimus ad has objectiones proxime sequentibus capitibus ». *Opera omnia*, p. 302 ; *Astronomia nova*, XXXIII, p. 381 (ma traduction).

⁴¹⁶ KOYRÉ (1961), p. 214.

⁴¹⁷ SIMON (1979), p. 336.

n'est pas libre de lois géométriques, à tout le moins pour cette action matérielle de transport.⁴¹⁸

C'est donc dire que cette vertu motrice, en tant qu'elle peut transporter des corps matériels dans l'espace et le temps, est soumise également à des lois géométriques. Pour illustrer cette assertion, Kepler reprend alors l'exemple de la lumière, qui bien qu'immatérielle a un effet sur les corps et est sujette à des lois optiques géométriques⁴¹⁹. Le fait de pouvoir illustrer cette possibilité chez une autre entité de même nature lui permet d'apporter un indice supplémentaire en faveur d'une vertu motrice, qui en tant que *species* immatérielle, peut agir à distance sur des corps selon des lois géométriques.

Cette nécessité de géométrisation n'est pas sans nous rappeler la théorie des archétypes formulée dans le *Mysterium cosmographicum*. Il n'est d'ailleurs probablement pas anodin que Kepler évoque ce concept dès le début du chapitre suivant, ce qui constitue alors la seule occurrence du mot « archétype » dans toute l'*Astronomia nova* : « Il s'ensuit que, par ce qu'indique cette *species* (ou archétype, ou image) qui se propage, nous contemplons aussi la nature plus profonde de sa source. »⁴²⁰ La notion d'archétype semble donc être toujours présente pour Kepler, même au cœur de ses recherches empiriques, et ici l'image archétypale (géométrique) devient l'occasion d'en savoir davantage sur la nature (physique) profonde de l'objet étudié.

L'examen de cette nature « plus profonde » de la vertu motrice dans ce chapitre 34 mène l'astronome à deux conclusions, toutes deux annoncées dans le titre du chapitre et ce, en ordre inverse de leur démonstration : « Le corps du Soleil est magnétique, et il tourne dans son espace »⁴²¹. En premier lieu, Kepler cherche à comprendre comment le pouvoir moteur peut entraîner les planètes dans un mouvement circulaire autour de sa source, alors qu'il se diffuse, tout comme la lumière, dans un axe Soleil-planète, donc dans une direction qui est perpendiculaire à cette trajectoire. En effet, si la *species* se diffuse en émanant du Soleil

⁴¹⁸ « quamvis virtus motrix non sit materiale quippiam, quia tamen **materiae**, hoc est corpori planetae **vehendo, destinatur, non liberam esse a legibus geometricis**, saltem ob hanc materialem actionem transvectionis. » *Opera omnia*, III, p. 303 ; *Astronomia nova*, XXXIII, p. 383 (ma traduction). Je souligne.

⁴¹⁹ Lois que Kepler a étudiées notamment dans son *Ad Vitellionem paralipomena, quibus Astronomiae pars optica traditur* (1604).

⁴²⁰ « Sequitur, ut indice hac defluente specie (ceu archetypo, imagine) ipsam etiam penitioem fontis naturam contemplemur. » *Opera omnia*, III, p. 304 ; *Astronomia nova*, XXXIV, p. 385 (ma traduction).

⁴²¹ « Corpus Solis esse magneticum, et in suo spatio converti. » *Opera omnia*, III, p. 304 ; *Astronomia nova*, XXXIV, p. 385 (ma traduction).

immobile, comme sa lumière, les planètes devraient être sans cesse repoussées depuis le centre et ne sauraient tourner autour de lui. Pour résoudre cette difficulté et sauvegarder la cohérence de son modèle, Kepler propose de doter le Soleil d'un mouvement de rotation, de telle sorte qu'il puisse diffuser sa vertu motrice via sa *species* selon un axe qui est en rotation perpétuelle, pouvant alors entraîner les planètes avec lui. Nous voyons là une autre occurrence de la disparition de la coupure traditionnelle entre physique céleste et physique terrestre, car Kepler cherche à expliquer le mouvement des cieux selon des forces similaires à celles que nous observons sur Terre. Ainsi, pour illustrer cette nécessité de rotation, il en réfère notamment à ce que nous observons dans le mouvement des catapultes. Mais c'est aussi pour des raisons conceptuelles que Kepler en arrive à cette nécessité :

De fait, parce que ce pouvoir s'étendant aux planètes depuis le Soleil meut celles-ci en cercle autour du corps immobile du Soleil, ce qui ne se produit ou ne peut être **saisi par la pensée** par nul autre moyen que ceci : que le pouvoir se meut en suivant la même voie, qui emporte toutes les autres planètes [...].⁴²²

La *species* diffusant la vertu motrice est donc affublée d'un mouvement de rotation, sinon il est impossible de concevoir, dans ce modèle, qu'elle puisse être la source du mouvement de révolution autour de sa source. Il pourrait toutefois être possible de concevoir que cette *species*, immatérielle, soit en rotation à l'intérieur d'un Soleil matériel qui demeure, lui, statique. Kepler prend toutefois soin de rejeter cette possibilité en se référant, encore une fois, à la lumière, dont l'émanation suit la direction de sa source. Il conclut alors, « de façon non absurde »⁴²³, que la source de la *species* est affublée du même mouvement que celui de la *species*, qu'elle soit lumineuse ou motrice. En outre, Kepler évoque la temporalité du mouvement : une *species* immatérielle affublée d'un mouvement de rotation entraînant des corps à se mouvoir doit absolument se trouver dans un corps affublé de ce même mouvement de rotation, sans quoi elle se retrouverait avec une vitesse infinie, entraînant alors les planètes selon une telle vitesse, ce qui n'est évidemment pas le cas⁴²⁴.

⁴²² « Nam quia virtus illa ex Sole ad planetas exporrecta in gyrum illos movet circa Solis corpus intransportabile, fieri id aut **cogitatione comprehend**i nullo alio modo potest, quam hoc, ut virtus eandem viam eat, quam alios planetas omnes abripit [...] » *Opera omnia*, III, p. 304 ; *Astronomia nova*, XXXIV, p. 385 (ma traduction). Je souligne.

⁴²³ « non absurde » *Opera omnia*, III, p. 305 ; *Astronomia nova*, XXXIV, p. 387.

⁴²⁴ *Idem*.

La deuxième conclusion annoncée dans le titre de ce chapitre, bien qu'elle affirme que le Soleil « soit » un corps magnétique – ce que Kepler est enclin à croire – ne doit toutefois pas nous faire perdre de vue que ce n'est pas une identité, mais bien une analogie que Kepler propose entre l'action de la *species* motrice et la force magnétique. C'est-à-dire que Kepler n'est pas totalement convaincu que la vertu motrice est une vertu magnétique, mais il croit que ces deux pouvoirs fonctionnent selon des principes similaires. Nous nous sommes penchés précédemment⁴²⁵ sur cette analogie magnétique, inspirée fortement par les travaux de Gilbert. Cette analogie se révélera plus féconde que l'analogie lumineuse en ce qu'elle permettra d'éviter les deux principales objections précédemment adressées à l'utilisation de l'analogie lumineuse : d'une part, la force magnétique ne se voit pas bloquée lorsqu'un corps opaque s'interpose entre sa source et l'objet qui subit cette force, ce qui évite le problème soulevé par l'occultation des planètes ; d'autre part, la force magnétique se transmet de façon rectiligne, tout comme l'action de la *species* motrice, ce qui n'est pas le cas de la propagation de la lumière. Autre avantage de l'analogie magnétique : elle permet d'envisager des forces qui ne sont pas simplement attractives, mais directrices. Comme le remarque Simon, dans un tel modèle inspiré par le magnétisme, « le Soleil n'attire pas les planètes, [...] il ne fait que les orienter »⁴²⁶ ce qui s'accorde encore mieux avec une vertu motrice située dans un Soleil immobile : en tournant sur lui-même, le Soleil émet une *species* sous forme de fibres magnétiques, toutes orientées dans une même direction qui est perpendiculaire aux pôles solaires, et qui entraînent ainsi les planètes sur leur trajectoire et les orientent en tout temps.

Kepler consacre plusieurs pages à tenter ensuite de montrer la compatibilité entre une telle *species* dotée d'une vertu motrice magnétique et le modèle géométrique qui est encore envisagé à cette étape, à savoir, une trajectoire circulaire excentrique avec un point équant. La difficulté sera pour lui de trouver une « cause naturelle de l'excentricité »⁴²⁷ de la trajectoire (ou, ce qui revient au même, de la nécessité d'ajouter un épicycle si l'on prend le Soleil comme centre réel de la trajectoire, ce qui était une alternative envisagée par Copernic). En d'autres mots, il s'agit de trouver une explication physique au fait que les planètes résistent, en quelque sorte, à l'action motrice du Soleil. Telle est la tâche de la nouvelle astronomie, fondée

⁴²⁵ À la section 3.4 de cette thèse.

⁴²⁶ SIMON (1979), p. 339.

⁴²⁷ « naturali causa ipsius eccentricitatis » *Opera omnia*, III, p. 313 ; *Astronomia nova*, XXXVIII, p. 404 (ma traduction).

sur les causes. Or sans le concept de gravité universelle, qui serait élaboré plus tard par Newton, il n'est pas aisé de fournir une telle explication physique.

Pour rendre son explication plus cohérente, Kepler la complète en invoquant un second élément jouant un rôle causal dans le mouvement des planètes, en plus de ce qu'il appelle maintenant la « force motrice » du Soleil, tel qu'énoncé dans le titre du chapitre 38 : « Outre la force motrice commune du Soleil, les planètes sont dotées d'une *vis insita* : et le mouvement de chacun d'eux est composé des deux causes »⁴²⁸. Cette force inhérente aux planètes peut se concevoir comme une forme de résistance, ou tendance de la planète à s'éloigner de ce qui est dicté par la *species* du Soleil, ce qui pourrait expliquer pourquoi elle suit un trajet excentrique. Elle sera toutefois abandonnée en cours de route, notamment grâce au concept d'« intelligence » des planètes.

C'est pour assurer que la planète puisse « connaître » la trajectoire à suivre que Kepler attribue, comme nous l'avons vu⁴²⁹ précédemment, une « intelligence » aux planètes. Cela lui fait notamment rejeter toute explication de l'excentricité invoquant les épicycles, car alors les intelligences des planètes n'auraient aucune façon de se repérer puisqu'elles devraient le faire à partir d'un point vide. Il est toutefois intéressant de constater, avec J.M. Escobar, que Kepler parle toujours de ces « intelligences » avec prudence, au conditionnel ou au subjonctif, jamais à l'indicatif⁴³⁰. Nous le voyons par exemple dans cet extrait :

Et vraiment, s'il était certain que ce mouvement propre au diamètre de l'épicycle ne pouvait pas être accompli par quelque vertu matérielle et corporelle ou magnétique d'une planète, ni même par une [vertu] animale nue, mais qu'il est gouverné par une intelligence d'une planète, **rien d'absurde ne serait établi**.⁴³¹

C'est d'ailleurs la même formulation quant à la non-absurdité de l'assertion qu'utilisait Kepler lorsque, nous l'avons vu plus haut, il concluait que le Soleil était affublé d'un mouvement de rotation. Certes, les spéculations physiques de Kepler, malgré la grande rigueur de ses

⁴²⁸ « Planetas praeter communem Solis vim motricem praeditos esse vi insita : et motus eorum singulorum componi ex duabus causis. » *Opera omnia*, III, p. 313 ; *Astronomia nova*, XXXVIII, p. 404 (ma traduction). « Vis insita » peut se traduire par « force inhérente » ou « force interne » mais, tout comme la *species*, je préfère laisser ce concept en latin.

⁴²⁹ À la section 3.1 de cette thèse.

⁴³⁰ Cf. ESCOBAR (2008), p. 24.

⁴³¹ « Et sane, si certum esset, motum hunc in epicycli diametro proprium non posse perfici a virtute aliqua planetae materiali et corporali sive magnetica, non etiam a nuda animali, sed gubernari a planetae mente, **nihil absurdi statueretur**. » *Opera omnia*, III, p. 318 ; *Astronomia nova*, XXXIX, p. 413 (ma traduction). Je souligne.

démonstrations, n'en demeurent pas moins des assertions plausibles et non certaines. Ces dernières deviennent d'autant plus probables que leurs résultats s'accordent non seulement avec les données empiriques, mais aussi avec les raisons *a priori*, avec ce qui peut être « saisi par la pensée », et avec un modèle géométrique pouvant tenir lieu d'archétype.

Lorsque Kepler reprend cette analogie magnétique plus loin, au chapitre 57, il a formulé entre temps la loi des aires et est convaincu que les orbites sont elliptiques. Il prend alors beaucoup de soin pour tenter de réconcilier ces deux résultats avec les raisons physiques de type magnétique. Or le simple pouvoir magnétique, au fil de ses démonstrations, lui semble insuffisant pour rendre compte des mouvements observés. Il ajoute alors une force de résistance des planètes, la faculté animale (< *facultas animalis* >), qui sera nécessaire à l'intelligence de la planète pour résister à ce qui est prescrit par sa faculté magnétique. Ces deux facultés vont lutter l'une l'autre pour dicter à l'intelligence de la planète la route à suivre⁴³². Néanmoins, cette invocation d'une faculté animale sera rejetée « car une faculté animale ne peut pas transporter son corps d'un endroit à un autre [...] sans le pouvoir d'un autre corps le soutenant »⁴³³. De cet argument, Kepler conclut alors que les intelligences des planètes sont guidées par la nature et le magnétisme : « Il y aura donc une faculté magnétique, c'est-à-dire naturelle, d'accord entre les corps de la planète et du Soleil. Donc l'intelligence appelle la nature et les aimants pour assistance. »⁴³⁴ Ce rejet d'une intervention animale et cette préférence pour une explication naturelle ne peuvent que nous mettre d'accord avec les propos d'Escobar : « although the animate faculty appears in the *Astronomia nova*, the well known Keplerian animism concerning the planets seems to be a historical mistake [...] »⁴³⁵ Nous avons vu que cet animisme, ou attribution d'une âme aux planètes, était bien présent dans le *Mysterium cosmographicum*, mais déjà on voyait qu'il concevait que l'action de ces âmes devait être dépendante de la position physique de leurs propriétaires – d'où la note de Kepler selon laquelle il suffit de changer le terme « âme » pour *species* immatérielle pour

⁴³² Cf. *Opera omnia*, III, p. 396 ; *Astronomia nova*, LVII, p. 569. Ce passage a été étudié à la section 3.4 de cette thèse.

⁴³³ « nequit enim facultas animalis transportare corpus suum de loco in locum [...] sine potestate alterius corporis adminiculantis ». *Opera omnia*, LVII, p. 396 ; *Astronomia nova*, LVII, p. 568 (ma traduction).

⁴³⁴ « Erit igitur magnetica facultas, hoc est naturalis consensus inter corpora planetae et Solis. Itaque mens naturam et magnetes in subsidium vocat. » *Opera omnia*, III, p. 396 ; *Astronomia nova*, LVII, p. 568 (ma traduction).

⁴³⁵ ESCOBAR (2008), p. 25.

obtenir plus ou moins la même théorie. Dans l'*Astronomia nova*, Kepler envisage plusieurs possibilités (dont les âmes planétaires par endroit, ou les intelligences dotées d'une faculté animale) et en vient à supposer simplement que les planètes ont des « intelligences », guidées par la nature et le magnétisme ; il demeure toutefois dans l'incertitude quant à l'existence réelle de ces intelligences, tout comme il demeure dubitatif face à ses explications magnétiques, qu'il tente d'accorder tant bien que mal avec les mouvements observés. Ces explications physiques demeureront toujours simplement plausibles, quoique nécessaires pour expliquer son modèle géométrique.

De Kepler, l'histoire des sciences n'aura pas retenu ces concepts d'« intelligence » des planètes, de *species*, de vertu motrice ou de vertu magnétique pour expliquer le mouvement céleste. Il faudra attendre Newton et ses concepts de gravité universelle et d'inertie pour que se voient pleinement expliquées, sur le plan de la physique, les lois du mouvement céleste. J'ai cru bon néanmoins d'exposer l'essentiel de ces recherches physiques puisqu'elles montrent à quel point Kepler, dans sa pratique scientifique, cherche véritablement à fonder sa nouvelle astronomie sur les causes. Nous voyons aussi le pas important qu'il franchit en adoptant une approche héliodynamique, qui s'intéresse au rôle causal du Soleil dans le mouvement des planètes et l'amène éventuellement à chercher des relations quantifiables impliquant la distance entre les planètes et le Soleil. Enfin, nous voyons que et comment Kepler abandonne peu à peu une explication animiste pour finalement accorder aux « intelligences » des planètes une faculté fonctionnant selon les mêmes règles que le magnétisme, ceci étant d'autant plus crédible que les mêmes forces semblent être en jeu sur Terre. Les résultats de ces recherches physiques ne sont néanmoins pas affirmés comme étant prouvés hors de tout doute, bien au contraire. Ces recherches n'en sont pas moins une étape importante vers la loi des aires, dont nous allons maintenant étudier la genèse.

La loi des aires

L'avant-dernière étape, pour la loi des aires, est exposée au chapitre 40 alors que l'astronome se penche à nouveau sur la relation des distances précédemment établie pour la trajectoire du Soleil par rapport à la Terre (et vice-versa). Cette relation, même si elle ne semble valide qu'aux apsides, n'en est pas moins un indice que nous sommes sur la bonne

voie pour découvrir un modèle décrivant adéquatement les mouvements célestes, d'autant plus qu'elle semble bien supportée par les raisons physiques. Elle serait d'ailleurs peut-être valide en tout point de la trajectoire si l'orbite n'était pas parfaitement circulaire, ce dont Kepler se doute depuis un bon moment. Mais fidèle à son habitude, Kepler laisse telles quelles ses démonstrations pour une orbite circulaire, en spécifiant, à l'intérieur d'un paragraphe qui a évidemment été ajouté après coup : « que la voie de la planète soit donc une excentrique parfaite : car combien la forme de l'ovale diffère d'elle est imperceptible dans la théorie du Soleil »⁴³⁶. Effectivement, nous pouvons remarquer avec Kepler que, à rebours, la trajectoire terrestre a une ellipse beaucoup moins prononcée que celle de Mars ; l'utilisation d'une orbite circulaire se révélait donc être une bonne approximation, surtout près des apsides.

Cette relation des distances, qui peut être exprimée par « $v_p / v_a = d_a / d_p$ » ou « $t_p / t_a = d_p / d_a$ » n'est toutefois pas facile à utiliser dans les calculs. Le problème est que, comme la vitesse de la planète varie à chaque instant en fonction de sa distance au Soleil, il est pratiquement impossible de calculer sa position en un moment précis sans calculer d'abord l'impact, en chaque moment de sa trajectoire depuis la ligne des apsides jusqu'à cet endroit, de cette distance sur sa vitesse ; ce qui revient à faire un calcul pour une somme très grande, voire infinie, de distances au Soleil qui ont été parcourues par la planète. Un tel calcul, sans les outils du calcul infinitésimal qui sera développé ultérieurement, semble impossible à réaliser pour Kepler, qui abhorre l'infini en vertu du fait qu'il n'est pas accessible à la pensée. C'est ce qu'il exprime clairement dans son *De Stella nova in pede Serpentarii* (1606) rédigé vers la même époque :

En vérité, un corps infini ne peut être compris par la pensée. En effet, les concepts de l'esprit au sujet de l'infini se réfèrent ou bien à la signification du mot « infini », ou bien à quelque chose qui excède toute mesure numérique, visuelle ou tactile concevable : c'est-à-dire à quelque chose qui n'est pas infini en acte, **vu qu'une mesure infinie n'est pas concevable.**⁴³⁷

⁴³⁶ « Sit ergo via planetae perfectus eccentricus : nam insensile est in theoria Solis, quantum ei ovalis forma detrahit. » *Opera omnia*, III, p. 320 ; *Astronomia nova*, XL, p. 417 (ma traduction).

⁴³⁷ « Sane ne cogitatione quidem comprehendi potest infinitum corpus. Nam conceptus mentis de infinito aut sunt de vocis infiniti significatione, aut de eo, quod mensuram omnem cogitatam numeri, tactus visusve excedit : quod non statim et actu infinitum est, **quia infinita mensura cogitatur nunquam.** » *Opera omnia*, II, p. 691 ; *De Stella nova in pede Serpentarii*, XXI, trad. A. Koyré, dans KOYRÉ (1973a), p. 97. Je souligne.

Alors que Kepler cherche une solution du côté de la géométrie, il se dit que la somme de ces distances infinies pourrait équivaloir à la surface du cercle : « Et comme je savais que les points de l'excentrique sont infinis, et que leurs distances sont infinies, il me vint à l'esprit que ces distances sont toutes comprises dans la surface de l'excentrique.»⁴³⁸ C'est à ce moment qu'il fait appel à cette « méthode imparfaite » mais suffisante⁴³⁹ qu'il emprunte à Archimède et qui, nous l'avons vu⁴⁴⁰, consiste à tracer une multitude de triangles rectangles à l'intérieur du cercle à partir de son centre et à établir une approximation entre l'aire de ces triangles, en un endroit précis du cercle, et l'aire de la portion de ce cercle au même point. Cette méthode d'exhaustion est toutefois « imparfaite », puisque Kepler, contrairement à Archimède, trace ces triangles non pas à partir du centre excentrique, soit le centre de la trajectoire, mais à partir du Soleil, comme le demande la relation des distances. Or, nous avons également noté au chapitre précédent que Kepler remarque à rebours, dans ce même chapitre, que cette erreur fut compensée de façon fortuite par une autre erreur, celle qui supposait que la trajectoire était parfaitement circulaire. Par conséquent, malgré le « paralogisme »⁴⁴¹, cette façon de calculer fonctionne relativement bien pour obtenir la trajectoire recherchée, sans être exacte.

Cette méthode de subdivision du cercle en triangles, dont l'un des sommets est le Soleil et les deux autres sommets sont des points de la trajectoire, permet à Kepler d'obtenir une approximation de l'impact des distances au Soleil parcourues entre deux points de sa trajectoire. Sa stratégie consiste à diviser le cercle excentrique en parties correspondant à des arcs égaux ; ainsi, mesurer les aires des triangles obtenus reviendra à mesurer le temps qu'il faut pour traverser les arcs de cercle qui lui correspondent, tel qu'établi par la relation des distances. Par exemple, à l'aphélie, la planète étant à son plus lent, elle prendra beaucoup plus de temps qu'ailleurs à traverser ce même arc de cercle, ce qui correspondra justement à l'endroit où la surface du triangle formé par le Soleil et les deux points du segment est à son maximum. De cette façon, Kepler croit éviter le problème de l'infini et c'est en procédant à cette démonstration que Kepler propose au passage une première formulation de la loi des

⁴³⁸ « Cumque scirem, infinita esse puncta eccentrici, et distantias earum infinitas, subiit, in plano eccentrici has distantias omnes inesse. » *Opera omnia*, III, p. 321 ; *Astronomia nova*, XL, p. 418 (ma traduction).

⁴³⁹ Comme l'indique le titre du chapitre 40. Cf. *Opera omnia*, III, p. 320 ; *Astronomia nova*, XL, p. 417.

⁴⁴⁰ À la section 3.3 de cette thèse.

⁴⁴¹ *Opera omnia*, III, p. 323 ; *Astronomia nova*, XL, p. 422.

aires (à noter que, dans ce passage, C désigne la position de la planète à l'aphélie, D à son périhélie, H et E désignent deux autres points entre les deux sur sa trajectoire):

Enfin, puisque les deux [*sc.* ensembles de lignes droites] de A [*sc.* le Soleil] et de B [*sc.* le centre de l'excentrique] remplissent le seul et même demi-cercle CDE, alors que celles érigées de A sont les distances mêmes dont la somme est recherchée : il me semblait pouvoir en conclure que, l'aire CAH ou CAE étant calculée, j'aurais la somme des distances infinies en CH ou CE : **non pas parce que l'infini peut être traversé, mais parce je pensais que la mesure de cette faculté, par laquelle les distances rassemblées étaient efficaces pour les délais accumulés, était contenue dans cette aire** ; de sorte que nous puissions ainsi l'obtenir par la connaissance de l'aire, sans aller jusqu'au dénombrement des parties les plus petites.⁴⁴²

Ce passage montre comment Kepler évite le problème de l'infini : l'aire (approximée par l'aire des triangles) ne représente pas vraiment la somme infinie des distances, mais plutôt l'effet cumulatif de la distance au Soleil sur les vitesses d'une planète en chacun de ses points, ou encore, pour reprendre les mots de Simon : « Ce que mesure pour lui la surface, *c'est l'effet chronologique de la variation de la force en fonction des distances sur un parcours donné* »⁴⁴³. Comme le mouvement a lieu dans un intervalle de temps précis, fini, il est possible de mesurer et de concevoir, en chacun de ses points, l'effet temporel de l'action du Soleil sans recourir à l'infini.

La démonstration de Kepler se poursuit en formulant de façon un peu plus précise cette loi des aires :

C'est pourquoi, à partir de ce qui est plus haut : de même que l'aire CDE se trouve à la moitié du temps de restitution [*sc.* du temps périodique], que nous avons dit à 180°, ainsi est l'aire CAG, CAH à la longueur de temps pour les délais sur CG et CH. **L'aire CGA devient donc la mesure du temps** ou de l'anomalie moyenne [*sc.* l'angle formé par la planète et l'aphélie mesuré depuis le point équant], qui

⁴⁴² « Cum denique utraque, et quae ex B et quae ex A, unum et eundem semicirculum CDE impleant, eae vero, quae ex A educuntur, sint distantiae ipsae, quarum summa quaeritur : hinc concludere mihi videbar, computata CAH vel CAE area, summam haberi infinarum distantiarum in CH vel CE : **non quod infinitum pertransiri possit, sed quod facultatis, qua pollent distantiae ad moras accumulandas, collectae mensuram in hac aranesse putarem**, ut ita eam adipisci possimus per cognitionem areae, citra minimarum partium dinumerationem. » *Opera omnia*, III, p. 321 ; *Astronomia nova*, XL, p. 419 (ma traduction). Je souligne.

⁴⁴³ SIMON (1979), p. 363.

correspond à l'arc de l'excentrique CG, puisque l'anomalie moyenne mesure le temps.⁴⁴⁴

L'aire des surfaces étant proportionnelle aux temps utilisés par la planète pour parcourir la même distance sur le cercle excentrique, il s'ensuit que si les aires sont égales, alors les temps sont égaux. De cette formulation, on peut donc en déduire ce qui a été retenu comme la seconde loi de Kepler, formulée ici alors que l'orbite est toujours envisagée de façon circulaire, donc sans même que la première loi ne soit affirmée.

Cette méthode de calcul, en traçant des triangles à partir du Soleil et non du centre de l'orbite, est toutefois inexacte. Kepler est d'ailleurs bien conscient que la relation des distances au Soleil n'est pas équivalente à la loi des aires. Pour montrer la différence, Kepler érige une courbe conchoïdale⁴⁴⁵ qui va comme suit : dans l'axe vertical, on retrouve la circonférence du cercle de l'excentrique, divisée en segments égaux ; dans l'axe horizontal est représentée la distance entre la planète et le Soleil, en chacun des points de sa trajectoire. Grâce à cette conchoïde, il est possible de comparer cette distance au Soleil avec la distance au centre de l'excentrique qui, étant fixe, forme une ligne droite verticale. La courbe obtenue représente donc la variation de la distance de la planète au Soleil, en chacun des points de sa trajectoire⁴⁴⁶ : cette distance est à son minimum au périhélie, à son maximum à l'aphélie, et forme un tracé ressemblant vaguement à une courbe sinusoïdale, sans être toutefois symétrique. Cette représentation géométrique permet de représenter l'aire de la portion du cercle délimitée par les différents endroits de la trajectoire excentrique et le Soleil (portion qui n'a pas exactement la forme d'une « pointe de tarte » puisque le centre de l'excentrique et le Soleil ne coïncident pas, mais qui est approximée par le triangle correspondant), aire que l'on pourrait obtenir en mesurant l'aire de la région délimitée par la courbe conchoïdale et les points de la trajectoire, cette région ayant la forme d'un rectangle dont l'un des côtés est courbe. Néanmoins Kepler n'a pas les outils géométriques pour en faire la quadrature et il lance un appel aux géomètres pouvant l'aider dans cette entreprise :

⁴⁴⁴ « Quare ex superioribus : sicut se habet CDE area ad dimidium temporis restitutorii, quod dicatur nobis 180°, sic CAG, CAH area ad morarum in CG et CH diurnitatem. Itaque **CGA area fiet mensura temporis** seu anomalie mediae, quae arcui eccentrici CG respondet, cum anomalia media tempus metiatur. » *Opera omnia*, III, p. 321 ; *Astronomia nova*, XL, pp. 419-420 (ma traduction). Je souligne.

⁴⁴⁵ Kepler mentionne en note de bas de page que cette courbe n'équivaut pas à celle de Nicomède (qu'il nomme Nicostratus), qui était infinie. À noter que les conchoïdes de Nicomède ont été reprises par Pappus d'Alexandrie et Apollonius.

⁴⁴⁶ Cf. *Opera omnia*, III, p. 324 ; *Astronomia nova*, XL, p. 425.

Et parce que cette époque a des géomètres très éminents, qui parfois se fatiguent très longtemps sur des choses dont l'usage n'est pas ainsi manifeste, je les appelle tous et chacun, qu'ils m'aident ici à trouver une quelconque surface plane, qui équivaut aux distances toutes entières rassemblées.⁴⁴⁷

Kepler compare ensuite cette conchoïde avec celle que l'on obtiendrait en appliquant la loi des aires, donc en se référant plutôt au centre du cercle, en procédant à la somme des distances entre la planète et un point fictif correspondant au point de rencontre entre la ligne issue du point de la trajectoire passant par le centre de l'excentrique et la ligne perpendiculaire que l'on peut tracer depuis le Soleil. Les deux courbes sont évidemment différentes : la première courbe, qui s'appuie sur des causes physiques, génère des distances (et des aires sous la courbe) plus grandes que celles obtenues à partir d'un point fictif mais calculé correctement selon la méthode d'Archimède. Autre différence : contrairement à la première courbe, la seconde courbe est symétrique. L'imperfection de la méthode est donc manifeste. Or Kepler ne se montre pas extrêmement troublé de la divergence entre le modèle physique (fondé sur les véritables distances au Soleil) et sa description géométrique :

J'ai donc voulu annoncer d'avance, d'une manière générale, ces choses **à partir du calcul de l'équation physique**, de sorte que, **quoique qu'elle ne soit pas encore suffisamment appuyée par l'aide nécessaire de la géométrie**, mais que toutes les inégalités des planètes ne sont pas encore dévoilées [...], cette opération ne sera pourtant pas trop séparée de cette spéculation [*sc.* à partir du calcul de l'équation physique] annoncée d'avance.⁴⁴⁸

Et de fait, la découverte ultérieure de l'ellipticité de l'orbite allait permettre à Kepler d'obtenir géométriquement des distances plus courtes (correspondant à la deuxième conchoïde) et d'adopter la loi des aires comme méthode de calcul légitime de l'effet de la distance au Soleil sur le parcours des planètes.

Il est vrai que ce chapitre a été remanié entre temps et qu'après coup, il est facile de dire que cette divergence n'était pas trop grave puisque, ultérieurement, il serait possible de

⁴⁴⁷ « Et quia haec aetas praestantissimos habet geometras, qui interdum in rebus non ita manifesti usus desudant diutissime, appello omnes et singulos, ut hic me juvent in plano aliquo inquirendo, quod aequipolleat collectis universis distantis. » *Opera omnia*, III, p. 324 ; *Astronomia nova*, XL, p. 424 (ma traduction).

⁴⁴⁸ « Haec itaque **de physicae aequationis computatione** generaliter praemittere volui, ut, **quamvis ea nondum a necessariis geometriae adminiculis satis est instructa**, sed neque dum omnes inaequalitates planetarum patefactae [...], non tamen nimium haec operatio a sua speculatione praemissa divideretur. » *Opera omnia*, III, p. 325 ; *Astronomia nova*, XL, p. 426 (ma traduction). Je souligne.

réconcilier modèle physique et description géométrique. Il peut sembler tout de même surprenant que, à l'étape où il bâtit ces conchoïdes, le rigoureux Kepler ne se soit pas davantage formalisé de la différence entre ces deux courbes et que sa loi des aires, qui à cette étape n'était vue que comme une approximation de ce qu'il concluait à partir de ses spéculations physiques, ait pu « survivre » malgré tout en tant qu'outil de mesure de la relation des distances, jusqu'à ce que cette loi des aires soit finalement confirmée par une description géométrique adéquate et en conformité avec les données observationnelles. Martens, qui voit un conflit entre, d'une part, une description plausible quant aux archétypes (soit la deuxième conchoïde, symétrique, mais calculée à partir de points fictifs), et d'autre part, une loi qui semble physiquement motivée (à partir des distances réelles au Soleil), se surprend que Kepler n'ait pas semblé davantage troublé par cette différence : « So if anything, Kepler's area rule is a counterexample to my thesis that he still required astronomy to conform to the archetypes »⁴⁴⁹ tout en prenant soin de spécifier que le travail n'est pas encore terminé et que Kepler finirait par trouver une description géométrique élégante de l'orbite de Mars. Pour ma part, je crois qu'il est effectivement important de mettre en valeur la ténacité de Kepler face à cette relation des distances et cette loi des aires qui auraient pu se voir réfutées ici en vertu de leur incohérence l'une envers l'autre. De plus, on se souvient que la relation des distances ne semblait valide qu'aux apsides, et nous venons de voir que les outils mathématiques utilisés ici pour la calculer étaient appliqués de façon inadéquate ; Kepler aurait pu se rabattre alors sur la seconde conchoïde, plus symétrique – et adopter ainsi une trajectoire elliptique – mais à cette étape il préfère garder confiance en une relation dérivée directement de la source de la vertu motrice tout en conservant son approximation géométrique. Comme quoi la volonté képlérienne de fonder l'astronomie nouvelle sur les causes physiques semble effectivement être ici plus importante que le besoin de trouver l'archétype mathématique correspondant. Néanmoins cette apparente mise de côté des archétypes peut être nuancée de deux façons. Ainsi, si l'on peut effectivement s'étonner que Kepler ait pu non seulement générer la loi des aires, mais avoir confiance en sa fiabilité malgré l'erreur avouée et démontrée dans l'emploi de la technique d'Archimède, rappelons-nous qu'il se produisait une combinaison d'erreurs faisant en sorte que cette erreur se voyait compensée par l'erreur de l'attribution d'une

⁴⁴⁹ MARTENS (2000), p. 87.

trajectoire circulaire ; effectivement, d'une part Kepler utilisait un modèle circulaire qui lui donnait des distances trop grandes, d'autre part son application de la technique d'Archimède lui faisait également obtenir des distances trop grandes, de sorte que la loi des aires demeurait effectivement une bonne approximation de la relation des distances pour des arcs très petits. Ensuite, Kepler avait le soupçon depuis un bon moment que la trajectoire des orbites n'était pas circulaire; il aurait été prématuré de rejeter la loi des aires et la relation des distances alors qu'il n'était pas encore parvenu à reconstruire cette trajectoire de façon exacte. Or si les distances étaient légèrement plus courtes loin des apsides, la relation des distances devenait envisageable en chacun de ses points et la loi des aires devenait une approximation encore plus exacte. Enfin, même si la loi des aires a été formulée dans le chapitre 40, chapitre qui clôt la troisième partie de l'*Astronomia nova*, c'est seulement plus tard qu'elle se voit pleinement justifiée, puisqu'elle est alors démontrée comme étant conforme à la forme elliptique des trajectoires, forme elle-même justifiée *a posteriori* pour les observations de la planète Mars et conforme aux spéculations physiques.

Avant d'en arriver à cette dernière étape, Kepler reformule cette loi des aires au chapitre 47, dans ce que certains commentateurs⁴⁵⁰ considèrent comme étant la première formulation claire de la seconde loi de Kepler :

Vraiment le délai, s'il est quelque chose d'autre, est certainement mesuré par la surface plane circonscrite par le chemin de la planète, de la façon la plus avantageuse (si ce n'est la plus parfaite).⁴⁵¹

La légère réserve exprimée dans sa formulation peut se comprendre vu qu'à cette étape, Kepler attribue à la planète Mars une trajectoire ovale⁴⁵² ; la loi des aires lui semble une bonne approximation mais elle ne correspond pas exactement à ce qui est obtenu comme forme de trajectoire. De plus, effectuer des calculs à partir de cette loi lorsque la trajectoire est ovale ne lui semble pas plus facile que dans le cas du cercle, comme il le démontre en construisant une nouvelle courbe⁴⁵³ selon le même modèle que pour les conchoïdes précédentes, courbe dont il n'arrive pas non plus à effectuer la quadrature et pour laquelle il demande encore une fois

⁴⁵⁰ Par exemple, GINGERICH (2002), p. 230.

⁴⁵¹ « moram vero, si quicquam aliud, planum certe circumscriptum itinere planetae compendiosissime (licet non perfectissime) metiatur » *Opera omnia*, III, p. 345 ; *Astronomia nova*, XLVII, p. 468 (ma traduction).

⁴⁵² Tel que démontré au chapitre 45.

⁴⁵³ Cf. *Opera omnia*, III, p. 347 ; *Astronomia nova*, XLVII, p. 473.

l'aide des géomètres : « Comme alors avant, au chapitre 40, pour l'étendue dans la conchoïde, ainsi maintenant pour le chemin dans l'ovoïde (ou si d'aventure tu préfères, métopoïde⁴⁵⁴), j'appelle les géomètres et j'implore leur travail. »⁴⁵⁵ Pour se faciliter la tâche, Kepler effectue une approximation avec l'ellipse, dont le calcul de l'aire peut se faire par rapport au cercle, tel que démontré par Archimède⁴⁵⁶. Mais puisque l'ovale, trajectoire attribuée à Mars, n'est pas une ellipse parfaite, Kepler ne considère pas que sa loi des aires soit suffisamment justifiée.

C'est seulement au chapitre 59 que la trajectoire elliptique est attribuée aux planètes et que la loi des aires, dont il est démontré qu'elle est conforme à cette forme de trajectoire, se voit pleinement justifiée. Nous pouvons voir dans cette formulation la dernière étape de la loi des aires, que la postérité allait retenir comme étant la « seconde loi de Kepler ». Néanmoins, au cours de la démonstration, il peut sembler curieux que Kepler ait encore le cercle comme point de référence. Cette formulation va comme suit :

En outre, du même lieu il apparaît aussi clair que l'aire du cercle, et totalement et dans ses parties singulières, est la mesure authentique de la somme des lignes par lesquelles les arcs du chemin elliptique planétaire sont distantes du centre du Soleil.⁴⁵⁷

De fait, tel qu'indiqué par le schéma accompagnant sa démonstration, l'ellipse finale est indissociable du cercle dans lequel elle s'inscrit. Ce cercle demeure utile pour le calcul de la loi des aires, qui semble ici n'être que suggérée comme moyen de calcul de l'effet des distances au Soleil. C'est notamment l'opinion de Donahue, qui remarque en note de bas de page que cette primauté éloquente de la loi⁴⁵⁸ des distances sur la loi des aires laisse croire que Kepler lui-même ne voyait celle-ci que comme une approximation calculatoire, même à ce stade :

⁴⁵⁴ Comme l'indique Donahue en note de bas de page, ce mot dérivé du grec « métôpon », signifiant « front » ou « visage », désigne une courbe ayant la forme d'un visage.

⁴⁵⁵ « Ut igitur prius cap. XL, in conchoide spatio, sic nunc iterum in ovoide (aut si forte mavis, metopoide) appello geometras eorumque opem imploro. » *Opera omnia*, III, p. 345 ; *Astronomia nova*, XLVII, p. 469 (ma traduction).

⁴⁵⁶ Cf. *Opera omnia*, III, p. 345 ; *Astronomia nova*, XLVII, p. 469. Nous avons analysé ce passage à la section 3.3 de cette thèse.

⁴⁵⁷ « Porro indidem etiam hoc patet, quod area circuli, et totaliter et per partes singulas, sit mensura genuina summae linearum, quibus distant arcus elliptici itineris planetarii a centro Solis. » *Opera omnia*, III, p. 404 ; *Astronomia nova*, LIX, p. 585 (ma traduction).

⁴⁵⁸ Nous pouvons maintenant passer de « relation » des distances à « loi » puisqu'elle est considérée comme étant justifiée et confirmée en tous les points de la trajectoire.

Kepler's manner of stating this theorem shows that he had still not accepted what we now know as 'Kepler's Second Law' as anything more than a convenient way of approximating the true law, stated in chapter 32, that the elapsed times over equal small arcs are proportional to the distances of those arcs from the sun. [...] Kepler actually used the area of the (imaginary) circle instead of that of the ellipse, which shows how far the 'area law' is removed from the physical truth as Kepler saw it.⁴⁵⁹

Ce point mérite effectivement d'être soulevé. Nous avons vu que pour Kepler, la loi des aires survient alors qu'il cherche à calculer l'effet de la somme des distances au Soleil, source de la vertu motrice ; beaucoup de difficultés surviennent lorsque vient le temps de procéder à ce calcul et à le rendre compatible avec la trajectoire attribuée aux planètes. L'astronomie fondée sur les causes demande uniquement une loi impliquant les distances de la planète au Soleil ; et la loi des aires, qui utilise ici un cercle fictif, semble s'éloigner d'un fondement physique, pourtant si cher à Kepler, et ne tenir lieu ici que d'un artifice permettant un calcul approximatif. Il faudrait attendre l'*Epitome astronomiae copernicanae* pour que, comme le remarque Koyré, « Kepler abandonne le détour par le cercle »⁴⁶⁰ lors de sa démonstration de la loi des aires. Mais l'on pourrait voir aussi dans l'adoption de ce cercle une façon hautement légitime de procéder à ce calcul, ayant l'avantage de faire appel à la véritable forme du monde et aux archétypes. C'est l'opinion de Martens, qui en appelle aux archétypes pour comprendre cette utilisation du cercle, « having the virtue of being the most divine plane figures »⁴⁶¹ qui vient encore une fois montrer l'importance, voire la nécessité, chez Kepler, d'imbriquer physique et archétypes géométriques. Cette interprétation archétypale ne me semble pas dénuée d'intérêt, surtout lorsque l'on remarque que plus tard, dans l'*Harmonice mundi*, toutes les démonstrations harmoniques se réfèrent ultimement au cercle, dont il faut imaginer que la circonférence correspond à une corde que l'on fait vibrer : « En ce qui concerne le chant, il suffit qu'une corde tendue en ligne droite puisse être divisée de telle sorte qu'elle soit divisée comme enroulée sur un cercle, selon le côté d'une figure inscriptible. »⁴⁶² Les proportions géométriques obtenues lorsqu'on inscrit des figures régulières à l'intérieur de ce cercle, qui le divisent alors en différentes parties, sont ainsi transposées sur une corde qui produit alors des

⁴⁵⁹ Note 16 de W.H. Donahue dans KEPLER ([1609] 1992), p. 585.

⁴⁶⁰ KOYRÉ (1961), p. 317.

⁴⁶¹ MARTENS (2000), p. 96.

⁴⁶² « Quod cantum attinet, sufficit chordam in rectum extensam sic dividi posse, ut dividitur, cum est in circulum contorta, a latere figurae inscriptilis. » *Opera Omnia*, V, p. 135 ; *Harmonice mundi*, III (ma traduction).

sons différents formant des intervalles harmonieux. Dans ce système harmonique, les planètes finissent par produire des intervalles « lumineux » harmonieux, que nous pouvons saisir si nous transposons les proportions obtenues (entre leurs vitesses angulaires et leurs distances au Soleil) sur un cercle, point de départ de la démonstration mais qui ne correspond nullement à la trajectoire physique et « réelle » des planètes.

C'est un peu la même chose pour la loi des aires : elle s'explique physiquement par la loi des distances, mais se calcule par rapport au cercle bien que la trajectoire physique soit elliptique. Il est fort possible que Kepler ait été ravi par cette explication faisant référence au cercle, forme archétypale par excellence qu'il n'avait pas abandonnée facilement, mais je ne crois pas que cette référence au cercle ait été une condition essentielle pour accepter la loi des aires dans l'*Astronomia nova*. La véritable justification archétypale du mouvement des planètes ne viendra que plus tard, grâce aux archétypes harmoniques, permettant de justifier un ordre mathématique du monde, réel et accessible à la pensée, conçu de façon dynamique. Dans l'*Astronomia nova*, la loi des aires ou loi des distances, dont nous avons vu qu'elle était soutenue de façon *a priori* (les archétypes ayant été ici invoqués pour le rôle du Soleil) et *a posteriori*, pourra survivre définitivement lorsqu'il sera démontré qu'elle engendre la loi des orbites elliptiques, et que cette dernière permet de reconstruire les orbites à partir des observations de la planète Mars, reconstruction géométrique qui se voit alors fondée sur les causes physiques. C'est ce lien entre explication physique et reconstruction géométrique qui importait véritablement dans l'*Astronomia nova*, et les deux lois devenaient alors partie intégrante du système de la nouvelle astronomie, rendant alors ce dernier cohérent et justifié de façon acceptable, quoique non encore dans sa forme la plus achevée.

Mais même si, dans l'*Astronomia nova*, les recherches archétypales ne sont pas explicitement présentes et encore moins abouties, elles n'en forment pas moins un horizon qui a sans doute guidé l'astronome dans son acharnement à comprendre de façon ordonnée et mathématique le mouvement non uniforme des planètes. Car au-delà des recherches physiques et qualitatives, la tentative képlérienne de comprendre de façon quantitative l'action motrice du Soleil variant selon les distances, de même que ses modèles physiques consistant en des « quantitative representations of the motion »⁴⁶³, pour reprendre les mots de Martens, sont

⁴⁶³ MARTENS (2000), p. 97.

impossibles sans la confiance qu'il y ait des régularités mathématiques dans la nature et qu'elles doivent être découvertes, non pas seulement pour remplir la tâche de la reconstruction géométrique des mouvements célestes, mais pour fournir des explications satisfaisantes sur le plan de la physique. Que la pleine justification archétypale n'ait pas été atteinte dans l'*Astronomia nova* ne signifie pas qu'elle ne devait pas être jugée « atteignable » pour l'astronome. Dans cet esprit, trouver une description géométrique en lien avec une explication physique était certainement un pas essentiel dans cette direction : c'est seulement lorsque la trajectoire elliptique des planètes a été découverte par Kepler qu'il a pu considérer que sa loi des aires était réellement plausible, car non seulement elle permettait de bien reconstruire les mouvements observés, mais l'on obtenait alors un système explicatif physique qui était animé par des régularités mathématiques. Un tel système était assurément le signe que nous étions en voie de saisir les archétypes ayant servi de modèles à la création et d'atteindre la connaissance véritable du monde, ou encore, pour reprendre les mots képlériens, d'élucider le mystère cosmographique.

4.4. La découverte de l'ellipse

L'importance de la découverte de la trajectoire elliptique a été immense pour la révolution astronomique. Elle permettait notamment de s'affranchir d'un *a priori* datant des débuts de l'astronomie antique, puis entériné par Aristote dans sa physique céleste, soit le principe de circularité des mouvements célestes. Même lorsqu'ils remarquaient que les mouvements planétaires observés ne semblaient pas parfaitement uniformes et circulaires, les astronomes, pour « sauver les phénomènes » et être cohérents avec les principes ouranophysiques, s'attachaient à les reconstruire par une combinaison de mouvements circulaires en utilisant des épicycles – ces derniers étant encore présents chez Copernic. C'est certainement en vertu de sa conception réaliste (et non instrumentaliste) de l'astronomie que Kepler s'est départi des épicycles, afin de trouver la forme véritable des orbites, et que tant qu'il n'aurait pas trouvé que celle-ci était cohérente avec la loi des aires, il ne pourrait pas considérer avoir percé le secret de l'orbite de Mars. Nous avons vu toutefois qu'il ne s'est pas rapidement départi du modèle circulaire excentrique, même après avoir formulé sa relation des distances. Ce n'est qu'une fois que cette tâche fut accomplie et que la cohérence entre la loi

des aires et la trajectoire elliptique fut établie que l'astronomie est devenue véritablement fondée sur une conception dynamique⁴⁶⁴, entrant ainsi dans l'ère moderne.

L'importance de ce changement conceptuel a incité le philosophe des sciences Norwood Russell Hanson à réviser l'importance de Copernic quant à la révolution scientifique, que l'on désigne parfois par « révolution copernicienne » : cette révolution devrait plutôt être désignée par l'expression « révolution képlérienne »⁴⁶⁵. Sur ce point, je suis parfaitement en accord avec Hanson. Il ne s'agit évidemment pas de nier l'apport de Copernic pour le développement de l'astronomie : le rejet du géocentrisme, sans être une idée parfaitement nouvelle, était certes un grand pas vers la nouvelle astronomie. Nous pourrions dire la même chose quant à sa volonté de proposer un modèle plus unifié, utilisant par exemple moins de points fictifs, comme les points équants ptoléméens. Néanmoins, le système de Copernic n'était pas plus adéquat pour s'accorder avec les observations que le système ptoléméen, comme le note Hanson : « Observational accuracy was the *main criterion*, with respect to which Brahe judged Copernicus to have failed. »⁴⁶⁶ L'idée communément répandue selon laquelle Copernic élaborait un système beaucoup plus adéquat avec les observations est donc fautive puisque c'est plutôt l'inverse qui incitait ses contemporains et premiers lecteurs à rejeter le modèle copernicien. En outre, affirmer que son système était plus simple est vrai seulement en partie : pour correspondre aux observations, sans point équant, plusieurs épicycles devaient être insérés. Enfin, le centre de l'orbite chez Copernic n'est pas le Soleil comme tel puisque les orbites sont excentriques et il n'y a certainement pas d'explication héliodynamique, même implicite, pour rendre compte des mouvements célestes.

En revanche, l'adoption de l'orbite elliptique permettait à Kepler de révolutionner l'astronomie et d'obtenir, sans épicycles, la forme des trajectoires en concordance avec les données observationnelles, trajectoire dont le mouvement était fondé sur une nouvelle physique céleste fonctionnant selon les mêmes principes que la physique terrestre. Cette longue route vers la découverte de la forme elliptique des trajectoires ne s'est toutefois pas faite sans heurts et inclut un nombre très élevé de vérifications empiriques et de tentatives de reconstruction géométrique par tâtonnement. Je ne vais pas retracer toutes ces étapes ni

⁴⁶⁴ Contrairement à celles de Newton, les conceptions dynamiques de Kepler n'ont pas été retenues, mais nous pouvons tout de même voir dans son système un premier modèle « astrophysique ».

⁴⁶⁵ HANSON (1961), p. 182.

⁴⁶⁶ HANSON (1961), p. 179.

procéder à l'explicitation de chacun des calculs empiriques. Je propose plutôt de mettre l'accent sur les principales étapes ayant permis ce changement conceptuel, dont certaines ont déjà été mentionnées plus haut. Nous verrons que ce changement s'est produit de façon graduelle et que les tâtonnements empiriques ont toujours été effectués en lien avec les spéculations physiques, donc en respectant l'exigence d'obtenir une reconstruction géométrique fondée sur les causes.

La toute première manifestation d'un doute quant à la trajectoire circulaire, chez Kepler, peut être retracée grâce à William H. Donahue, qui dans un article⁴⁶⁷ tout à fait spécial, procède à la traduction et au commentaire d'un extrait des cahiers de travail sur Mars remplis par Kepler dès son arrivée à Prague, en 1600, pour rejoindre Tycho Brahe. En étudiant ces manuscrits, il est possible de constater que Kepler envisage pour la première fois une trajectoire planétaire non circulaire alors qu'il construit, à partir des observations de la planète Mars, la forme de sa trajectoire en concevant que son mouvement est réellement doté d'une vitesse non uniforme, en lien avec sa distance au Soleil. Or ce résultat est immédiatement rejeté, comme le note Donahue : « Kepler presents six heliocentric positions of Mars together with their distances, and notes that if the eccentric anomalies and the distances are put together **an oval results** – a consequence that he rejects as **absurd** ! »⁴⁶⁸ Une cinquantaine de pages plus loin, cependant, Kepler est prêt à accepter une forme ovale pour l'orbite de Mars : « Car de là, il arrive que l'aire du **cercle ovale de Mars** s'entasse plus selon la ligne de l'apogée, et pour la même raison le délai. »⁴⁶⁹ Avec l'aide de Gingerich, Donahue conclut que ce passage peut être raisonnablement daté du début du mois d'avril 1602, ce qui est relativement tôt dans les recherches de l'orbite de Mars, qui se sont déroulées entre février 1600 et juin 1606⁴⁷⁰ – la publication ayant été reportée à 1609 pour des raisons de financement et d'obstacles juridiques de la part des héritiers⁴⁷¹ de Tycho Brahe, décédé en 1601. Si nous avons là une première manifestation chez Kepler d'une acception d'une trajectoire non circulaire, nous pouvons remarquer avec Donahue que la formulation « cercle ovale » demeure très près de la

⁴⁶⁷ Cf. DONAHUE (1993).

⁴⁶⁸ DONAHUE (1993), p. 73. Je souligne.

⁴⁶⁹ « Nam inde fit ut area **circuli Martis ovalis** coacervetur magis versus lineam apogaei, quare et mora » (K531=P357) Texte retranscrit par DONAHUE (1993), p. 79 (ma traduction). Je souligne.

⁴⁷⁰ SIMON (1979), p. 305.

⁴⁷¹ Ceux-ci reprochaient à Kepler d'avoir utilisé les observations de Tycho Brahe, qui l'avait invité à travailler avec lui, pour défendre son propre système. Cf. SIMON (1979), p. 308.

circularité ; et avant d'abandonner définitivement le modèle circulaire, Kepler fournirait encore beaucoup d'efforts pour le sauvegarder.

L'astronome note à rebours, dans l'introduction à l'*Astronomia nova*, à quel point cet attachement au mouvement circulaire lui a causé d'ennuis lorsque vint le temps de le conjuguer avec les spéculations physiques quant à la vertu motrice émanant du Soleil selon un mouvement circulaire et suivie par les intelligences des planètes :

Ces moteurs établis par cette voie d'argument me causèrent une quantité de travail incroyable dans la Partie IV ; alors qu'ils devaient révéler les distances de la planète au Soleil et les équations excentriques, ils révélèrent des irrégularités et s'écartèrent des observations : **non parce qu'ils avaient été introduits à tort, mais parce que je les avais enchaînés comme aux moulins des cercles, fasciné par l'opinion commune : liés par de telles chaînes, ils ne pouvaient pas faire leur œuvre.**⁴⁷²

C'est sans doute à cette étape cruciale des recherches sur la planète Mars que s'est véritablement produit l'abandon du paradigme circulaire. Auparavant, suite à l'échec de l'*hypothesis vicaria* pour rendre compte des observations des mouvements de Mars, Kepler aurait pu remettre en doute ce principe qui faisait partie des prémisses pour construire le modèle. Mais c'est seulement lorsqu'il se rendit compte qu'il était impossible de réconcilier une trajectoire circulaire avec la relation des distances du chapitre 32 (qui, même si elle était quantitativement fautive, se révéla ainsi jouer un « rôle heuristique »⁴⁷³ important) qu'il essaya véritablement d'autres hypothèses, afin de rendre compte des observations.

Il peut sembler surprenant que, tandis que l'ellipse aurait pu être « vue » lors de la construction des conchoïdes du chapitre 40 (puisque la seconde conchoïde, soit la courbe de la loi des aires calculée en lien avec le centre du cercle, était équivalente à la courbe d'une trajectoire en forme d'ellipse), elle ne fut pas adoptée alors, pour des raisons essentiellement physiques. Mais aussi étrange que cela puisse paraître, Kepler voyait alors la courbe des aires

⁴⁷² « Hac argumentandi via constituti motores isti incredibile dictu quantum mihi laboris exhibuerint parte quarta, dum distantias planetae a Sole, dum aequationes eccentrici prodere jussi, vitiosas produunt et ab observationibus dissentiunt : **non quod falso fuerint introducti, sed quia circulatorum quasi pistrinis illos alligaveram, fascinatus opinione vulgari : quibus illi compedibus nexi opus suum facere non poterant.** » *Opera omnia*, III, p. 156 ; *Astronomia nova*, Introduction, pp. 67-68 (ma traduction). Je souligne.

⁴⁷³ SIMON (1979), p. 370. À ce sujet, Koyré remarque que c'est seulement dans l'*Epitome astronomiae copernicanae* que Kepler apportera des correctifs à sa dynamique pour la rendre compatible avec la loi des aires. Cf. KOYRÉ (1961), pp. 320-321. Wilson remarque avec justesse que Kepler effectue quelques correctifs déjà au chapitre 59 : « Later, in Ch. 59, Kepler shows that in the case of the elliptical orbit the area rule can be reconciled with a modified radius rule. » Cf. WILSON (1968), note 51, p. 15.

comme une approximation de la relation des distances, et non l'inverse ; ainsi en allait-il pour cette seconde conchoïde, qui n'était vue alors que comme une approximation également. À cette étape de l'*Astronomia nova*, nous avons vu que Kepler avait noté à rebours que l'orbite circulaire était une erreur, qui serait démontrée plus loin. Il faudrait attendre le chapitre 44 pour que soit affirmée positivement la non-circularité des trajectoires, comme l'annonce le début de son titre : « Que le chemin des planètes à travers l'air éthéré n'est pas circulaire [...] »⁴⁷⁴. De fait, lorsqu'il tente de trouver cette trajectoire des planètes à partir de ses spéculations physiques et des données de la planète Mars, Kepler conclut que les distances sont plus courtes lorsqu'elle s'éloigne des apsides, ce qui donne une orbite de forme ovale qu'il décrit ainsi : « Ceci est donc clair : l'orbite de la planète n'est pas un cercle, mais entre peu à peu sur les deux côtés, et ressort vers l'ampleur du cercle au périhélie : on appelle la figure d'un chemin de cette sorte un ovale »⁴⁷⁵. Cette figure ovale, telle que décrite ici, n'est toutefois pas une ellipse, contrairement à ce qu'ont pu le penser certains commentateurs, qui furent probablement influencés, comme le suggère Hanson⁴⁷⁶, par le fait que Kepler évoque, quelques chapitres plus loin, « l'ellipse du chapitre 45 »⁴⁷⁷. Or il s'agit plutôt d'une forme ovoïde, terme que Kepler emploie également par la suite, dont la partie plus enflée se retrouve près du Soleil. Sans que ce ne soit explicitement énoncé, nous pouvons aisément supposer que Kepler ait pu concevoir qu'il était plausible que les orbites aient, à défaut d'une trajectoire circulaire, une forme d'œuf, symbole de l'origine de la vie et forme géométrique que nous pouvons retrouver ailleurs dans la nature – même sur le visage humain, comme l'évoque le terme « métopoïde » qui, nous l'avons vu plus haut, est également employé par Kepler.

Cette adoption de l'ovale n'allait toutefois pas être de tout repos pour l'astronome. Dans le chapitre suivant (chapitre 45), Kepler raconte combien il a mis d'efforts et de temps pour montrer que cette forme ovoïde pouvait résulter d'un modèle circulaire, respectant la loi des distances en y ajoutant des épicycles (sur lesquels la vitesse de la planète varierait par rapport à sa distance au Soleil). Cette rechute vers les épicycles peut sembler surprenante, d'autant

⁴⁷⁴ « Viam planetæ per auram ætheream non esse circulum [...] » *Opera omnia*, III, p. 335 ; *Astronomia nova*, XLIV, p. 451 (ma traduction).

⁴⁷⁵ « Itaque plane hoc est : orbita planetæ non est circulus, sed ingrediens ad latera utraque paulatim, iterumque ad circuli amplitudinem in perigæo exiens : cujusmodi figuram itineris ovalem appellitant. » *Opera omnia*, III, p. 336 ; *Astronomia nova*, XLIV, p. 453 (ma traduction).

⁴⁷⁶ Cf. HANSON ([1958] 1965), p. 81.

⁴⁷⁷ « ellipsis cap. XLV » *Opera omnia*, III, p. 400 ; *Astronomia nova*, LVIII, p. 575.

plus que Kepler avait déjà conclu au chapitre 39 à l'absurdité de l'adoption de ces épicycles compte tenu de l'attribution d'une intelligence aux planètes qui ne pourrait alors pas être guidée correctement. Au sujet de ce retour vers les épicycles, l'astronome se montre, après coup, assez dur en son endroit, mettant cette rechute sur le compte de son empressement à ériger une orbite de forme plus probable et correspondant aux observations⁴⁷⁸.

Une fois revenu sur le droit chemin en renonçant aux épicycles, Kepler tente de calculer la loi des distances pour une trajectoire ovoïde ne résultant pas d'une combinaison de cercles. Néanmoins il était très difficile de procéder à des calculs pour cette forme. Nous avons vu⁴⁷⁹ que Kepler l'approxime avec une ellipse au chapitre 47. Notons que cette ellipse est inscrite à l'intérieur de l'ovale et qu'il procède alors au calcul des aires en ajoutant, à l'aire obtenue via l'ellipse, une portion de la lunule correspondant à la différence entre le cercle et l'ellipse. Or c'est en vain qu'il tente de réconcilier la loi des distances, les données d'observation et l'ovale : il obtient des distances trop courtes. Après maints tâtonnements empiriques⁴⁸⁰, exposés dans les chapitres 46 à 50, Kepler conclut que la juste forme se retrouve entre les deux :

Et tu noteras une seconde fois, ce qui était dans le chapitre 47, que la vérité est dans un lieu médian entre ces deux méthodes (dont celle-ci décrit un cercle parfait, celle-là un ovale, à partir de l'opinion du chapitre 45).⁴⁸¹

Ce lieu médian, ce sera éventuellement l'ellipse, mais elle n'est pas encore affirmée à ce stade. Il restera ensuite à tenter de concilier cette forme avec les spéculations quant à la nature de la vertu motrice. On se souvient que Kepler a établi que le Soleil, doté d'un mouvement de rotation interne, diffuse son pouvoir moteur via sa *species*, et que le recours à une vertu motrice de nature magnétique permettait d'expliquer que le Soleil, même en diffusant cette *species* de façon perpendiculaire à la trajectoire de la planète, puisse l'entraîner dans ce mouvement. Néanmoins, s'il s'agissait de la seule force en jeu, les planètes seraient dotées d'un mouvement de révolution parfaitement circulaire et non excentrique. Avec la précision

⁴⁷⁸ *Opera omnia*, III, p. 337-338 ; *Astronomia nova*, XLV, p. 455.

⁴⁷⁹ Aux sections 3.3 et 4.3 de cette thèse.

⁴⁸⁰ Je ne vais pas exposer le détail de ces tâtonnements empiriques puisqu'ils ne me semblent pas apporter quelque chose de particulièrement nouveau pour l'objet de cette thèse.

⁴⁸¹ « Et notabis rursum, quod et cap. XLVII, veritatem inter hos duos modos (quorum hic perfectum circulum, ille ovalem ex opinione cap. XLV. describit) esse loco medio [...] » *Opera omnia*, III, p. 362 ; *Astronomia nova*, L, pp. 499-500 (ma traduction).

de la trajectoire, entre l'ovale et le cercle, la façon exacte dont la planète Mars « résiste » à cette force, en s'éloignant du cercle puis en s'en rapprochant près des apsides, est connue de plus en plus précisément. C'est ce mouvement de libration que Kepler tente de comprendre, par des raisons physiques compatibles avec la description géométrique qui engendrent les mouvements observés.

Aux chapitres 56 et 57, Kepler conclut, à partir des observations et à l'aide d'une découverte « fortuite »⁴⁸² qu'il généralise ensuite à l'ensemble des points, que ce mouvement de libration varie en fonction du *sinus versus*⁴⁸³ de l'angle, à l'excentrique, du rayon vecteur relié à l'épicycle qui pourrait être invoqué (seulement à des fins calculatoires) pour rendre compte de ce mouvement. Or il se trouve qu'un tel mouvement de libration est parfaitement compatible avec une forme elliptique ; mais Kepler ne s'en rend pas compte tout de suite. Koyré interprète cette absence de découverte comme le signe que Kepler ne pouvait « se libérer du chemin circulaire [...], hanté par la spectre de l'épicycle »⁴⁸⁴. Simon y voit plutôt le besoin képlérien « d'isoler cinématiquement cette composante proprement planétaire du mouvement, afin d'en rendre compte dynamiquement »⁴⁸⁵ et donc, son attachement aux explications physiques. Je crois que c'est cette dernière interprétation qui est la plus juste : Kepler consacre beaucoup de temps et d'efforts, dans les chapitres suivants, à étudier la dynamique sous-jacente au mouvement de libration et à étudier la nature et le fonctionnement de la force qui puisse être en cause, fonctionnement physique qui doit se comprendre selon un ordre mathématique. L'explication qui sera finalement retenue comme étant la plus plausible, au chapitre 57, peut se résumer ainsi : la planète est dotée d'une vertu magnétique dont l'axe est en tout temps parallèle à la ligne des apsides, et l'un de ses pôles l'attire vers le Soleil, tandis que l'autre la repousse, engendrant un système qui, pour des raisons d'équilibre et de balance, génère le mouvement que nous observons. L'intelligence de la planète peut ainsi

⁴⁸² « forte fortuito » *Opera omnia*, III, p. 384 ; *Astronomia nova*, LVI, p. 543. Kepler raconte dans ce passage que c'est par hasard qu'il remarqua que, près de l'endroit où la longitude est de 90°, la sécante de l'angle formé entre le centre du cercle (à l'intérieur duquel s'inscrit la forme de la trajectoire), le Soleil et la planète, était supérieure au rayon d'une valeur qui équivalait précisément à la largeur de la lunule en cet endroit.

⁴⁸³ Cette fonction est équivalente, pour un angle a , à $(1 - \cosinus a)$.

⁴⁸⁴ KOYRÉ (1961), p. 236.

⁴⁸⁵ SIMON (1979), p. 379.

s'orienter en tout temps, aidée par la nature et les aimants⁴⁸⁶. Kepler croit ainsi avoir une explication plausible physique de ce mouvement de libration.

La dernière alternative, avant d'en arriver à l'ellipse finale, est d'envisager une trajectoire « joufflue » (< *buccosum* >⁴⁸⁷), qu'il construit au chapitre 58 de façon erronée à partir du mouvement de libration. Kepler nous raconte qu'il découvre l'erreur de façon empirique (les positions obtenues diffèrent de 5' par rapport aux observations) et que cela l'amène à remettre en cause le fait que le mouvement de libration varie en fonction du diamètre de l'épicycle. Mais comme le remarquent avec justesse Barker et Goldstein, ce n'est pas strictement pour des raisons empiriques que Kepler rejette ici la *via buccosa* : « Here the alternative curve is eliminated, not because it fails to fit the observations but because the ellipse – and only the ellipse – follows from the combination of the distance-velocity law and the reciprocation⁴⁸⁸ law. »⁴⁸⁹ Si la confrontation avec les données empiriques permettait de déceler l'erreur, le véritable problème était qu'il n'y avait pas de cohérence interne dans ce système : la *via buccosa* n'était pas compatible avec le mouvement de libration établi, plus haut, en relation avec l'angle formé par le rayon vecteur de l'épicycle.

Kepler met donc de côté ce mouvement de libration et revient à ses recherches sur la forme ovale, se rappelant que cette dernière lui faisait obtenir des distances trop courtes ; il envisage alors une ellipse un peu plus grande, se situant à mi-chemin entre cet ovale et le cercle. Cette fois-ci, les résultats empiriques sont enfin concluants. Néanmoins Kepler croit alors que cette trajectoire elliptique est en contradiction avec le mouvement de libration tel qu'établi plus haut, ce qui lui semble incompréhensible. Kepler se montre à nouveau dur à son propre endroit lorsqu'il découvre enfin que cette ellipse était parfaitement compatible avec ce mouvement de libration, qui ne pouvait qu'engendrer cette forme :

En vérité, le plus grand scrupule était que, considérant et cherchant presque jusqu'à la folie, je ne pouvais pas trouver pourquoi la planète, à qui avait été attribuée une libration LE sur le diamètre LK avec tant de probabilité, et tant d'accord avec les distances observées, voulait suivre plutôt une voie elliptique, les équations l'indiquant. Ô ridicule de moi ! **Comme si la libration sur le diamètre ne pouvait**

⁴⁸⁶ Cf. *Opera omnia*, III, p. 396 ; *Astronomia nova*, LVII, p. 568. Ce passage a été reproduit à la section 4.3 de cette thèse.

⁴⁸⁷ *Opera omnia*, III, p. 399 ; *Astronomia nova*, LVIII, p. 573.

⁴⁸⁸ C'est-à-dire le mouvement de libration.

⁴⁸⁹ BARKER et GOLDSTEIN (2001), p. 110.

pas être la voie vers l'ellipse. Ce n'est donc pas sans valeur pour moi que cette nouvelle s'établit, **qu'une ellipse pouvait être engendrée conformément à la libration.**⁴⁹⁰

Une fois cette correspondance obtenue, il ne restait plus qu'à en faire la démonstration.

Cette démonstration se trouve au chapitre 59, chapitre qui, nous l'avons vu, contient également la loi des aires sous sa dernière forme. La trajectoire elliptique est alors construite dans un cercle de la façon suivante, en suivant la définition tirée des *Coniques* d'Apollonius : le rapport entre le segment du point de l'ellipse et son intersection perpendiculaire avec son grand axe et le segment de cette perpendiculaire jusqu'au cercle est toujours constant. Le grand axe correspond évidemment à l'axe des apsides, et le Soleil sera éventuellement désigné comme étant un foyer de l'ellipse – ce qui sera énoncé de façon explicite seulement dans l'*Epitome astronomiae copernicanae*. Cette trajectoire est alors mise en correspondance avec le mouvement de libration, puis avec la loi des aires, dont les calculs se font selon l'aire des portions de cercle à l'intérieur duquel s'insère l'ellipse ; mais ce cercle n'est là que pour permettre de mesurer l'accumulation des distances au Soleil, en ce que le rapport de l'aire balayée par la planète sur l'ellipse depuis le Soleil et de l'aire totale de l'ellipse est le même que le rapport de l'aire balayée sur la projection de cette position sur le cercle excentrique (sur une ligne perpendiculaire à l'axe des apsides) et de l'aire de ce cercle. Comme le remarque Simon : « on peut faire l'économie complète du cercle excentrique, qui devient désormais un auxiliaire inutile »⁴⁹¹. Auxiliaire inutile mais utilisé par Kepler pour effectuer ses calculs, qui ne sont toujours pas de tout repos. Au chapitre suivant, en voulant démontrer la supériorité de la « méthode, à partir de cette hypothèse physique, c'est-à-dire authentique et la plus vraie »⁴⁹² sur la méthode utilisant l'hypothèse alternative (< *hypothesis vicaria* >), il se heurte à une difficulté⁴⁹³ d'ordre technique pour laquelle il demande l'aide des géomètres, dont celui qui

⁴⁹⁰ « Multo vero maximus erat scrupulus, quod pene usque ad insaniam considerans et circumspiciens invenire non poteram, cur planeta, cui tanta cum probabilitate, tanto consensu observatarum distantiarum, libratio LE in diametro LK tribuebatur, potius ire vellet ellipticam viam, aequationibus indicibus. O me ridiculum ! perinde **quasi libratio in diametro non possit esse via ad ellipsin**. Itaque non parvo mihi constitit ista notitia, **juxta librationem consistere ellipsin** [...]. » *Opera omnia*, III, p. 400 ; *Astronomia nova*, LVIII, p. 576 (ma traduction). Je souligne.

⁴⁹¹ SIMON (1979), p. 385.

⁴⁹² « Methodus, ex hac physica, hoc est genuina et verissima hypothesi [...] » *Opera omnia*, III, p. 407 ; *Astronomia nova*, LX, p. 592 (ma traduction).

⁴⁹³ Pour une explication de cette difficulté géométrique, cf. KOYRÉ (1961), pp. 277-280.

pourra lui montrer son erreur sera alors considéré comme « le grand Apollonius »⁴⁹⁴. Il n'abandonnera pas son modèle pour autant et procédera à une démonstration plus complète et satisfaisante dans l'*Epitome astronomiae copernicanae*, sans recourir à des cercles, et en y apportant quelques rectifications dynamiques⁴⁹⁵.

L'*Astronomia nova* se termine par une brève étude des latitudes de la planète Mars. Cette cinquième et dernière partie de l'ouvrage fut peu étudiée par les commentateurs, et pour cause : ces calculs comportent plusieurs erreurs, à la fois empiriques et démonstratives, laissant croire que Kepler voulut terminer rapidement cet ouvrage après toutes ces années au terme desquelles il crut avoir enfin gagné sa guerre contre la planète Mars. Comme le remarque Donahue, au cours de ces démonstrations : « Here again one can see the haste with which this chapter was composed. »⁴⁹⁶ La fin précipitée de l'*Astronomia nova* n'enlève toutefois rien au fait que l'astronomie nouvelle venait d'y connaître son véritable coup d'envoi grâce à ce système de trajectoires elliptiques, fondées sur la loi des aires, en conformité avec une conception héliodynamique du monde et engendrant les mouvements observés. Certes, il faudrait attendre l'*Harmonice mundi* et l'*Epitome astronomiae copernicanae* pour en avoir une démonstration plus exacte et une justification plus complète, via les archétypes harmoniques.

De Kepler, la postérité ne retiendra ni les justifications archétypales ni les conceptions dynamiques, mais elle conservera les lois du mouvement planétaire. Certes, de par son contenu scientifique, Kepler a révolutionné l'astronomie ; l'adoption de l'ellipse pourrait d'ailleurs être en elle-même suffisante pour parler d'une « révolution képlérienne », libérant l'astronomie traditionnelle du paradigme de la circularité des mouvements célestes. Mais nous pouvons constater, suite à notre lecture attentive de l'*Astronomia nova*, qu'il serait réducteur et erroné de faire de Kepler celui qui a simplement réussi à « remarquer » l'ellipse parmi les nouvelles données d'observation de Tycho Brahe. Sans nier qu'une forme de tâtonnement empirique ait été présente, nous avons vu comment l'adoption de cette ellipse passait par la loi des aires, tant dans sa découverte que dans sa justification, et que cette loi des aires était elle-

⁴⁹⁴ *Opera omnia*, III, p. 411 ; *Astronomia nova*, LX, p. 601. Ce passage a été retranscrit à la section 3.3 de cette thèse.

⁴⁹⁵ Pour les corrections apportées par l'*Epitome astronomiae copernicanae*, dont il n'existe malheureusement à ce jour aucune traduction complète, cf. SIMON (1979), pp. 386-387 et pp. 426-439, ainsi que KOYRÉ (1961), pp. 285-327.

⁴⁹⁶ Note 37 de W.H. Donahue dans KEPLER ([1609] 1992), p. 656.

même inférée à partir de sa conception héliodynamique du monde, en passant par de nombreuses étapes démonstratives que nous avons mises au jour. L'apport de Kepler, outre ses découvertes scientifiques comme telles, serait donc à chercher également du côté de son projet, celui d'une astronomie véritablement fondée sur les causes physiques, et non simplement observationnelle ; causes physiques dont l'effet sur les mouvements observés, réellement non uniformes, pouvait être saisi de façon géométrique et mathématique. Cette imbrication de raisons *a priori* et *a posteriori* était sans aucun doute nécessaire pour répondre aux exigences de la nouvelle astronomie. Nous sommes maintenant prêts à voir comment nous pouvons interpréter, avec les outils de la logique de la découverte, et plus précisément ceux de la logique abductive, ce procédé de génération d'hypothèses astronomiques.

DEUXIÈME PARTIE : Abduction et découverte scientifique

Chapitre 5

La connaissance scientifique des phénomènes célestes : un discours vraisemblable

Notre étude attentive de l'*Astronomia nova*, appuyée par notre compréhension du projet de Kepler et de son caractère novateur par rapport aux projets astronomiques de ses prédécesseurs, nous a permis de constater comment se déployaient constamment des raisons *a priori* et des raisons *a posteriori* lors de la justification de chacune des étapes ayant jalonné la route vers la nouvelle astronomie. Il est maintenant temps de se pencher plus en profondeur sur la dialectique entre le système explicatif (*explanans*) et les observations (*explananda*), afin de mieux comprendre la démarche scientifique képlérienne, et plus précisément, son processus de découverte. Nous avons noté, au tout début de cette thèse⁴⁹⁷, que les premiers commentateurs de Kepler ont eu tendance à réduire sa démarche au simple fait d'avoir réussi à « voir » le parcours elliptique des planètes à partir des nouvelles données observationnelles de Tycho Brahe, mettant de côté tous les aspects autres que le tâtonnement empirique, aspects jugés irrationnels ou non scientifiques. D'autres commentateurs ont choisi de s'intéresser plus en profondeur au contexte de découverte dans toute sa richesse, mettant en valeur l'importance de la justification *a priori* et la fécondité de « faux » présupposés tels que l'attribution d'une âme au Soleil, faisant de Kepler un soi-disant mystique ayant découvert, un peu par hasard et pour des raisons encore une fois jugées non scientifiques, les lois qui ont donné le coup d'envoi à la nouvelle astronomie. Ces deux approches inverses me semblent toutes deux incomplètes et erronées, en ce qu'elles nient le rôle (qui va bien au-delà d'une découverte fortuite) de ces présupposés mathématiques, métaphysiques, philosophiques et théologiques, au cœur d'une production rationnelle et féconde d'hypothèses astronomiques.

Les contributions de C. S. Peirce (1839-1914) et de N.R. Hanson (1924-1967), qui se sont intéressés à la logique de la découverte, ont permis de remédier à la situation, en proposant d'interpréter la découverte de l'orbite de Mars par Kepler comme un cas particulier de raisonnement par abduction, qui se distingue de la déduction et de l'induction quantitative.

⁴⁹⁷ À la section 1.1.

Conçue parfois comme un type d'inférence à la meilleure explication, l'abduction consiste à inférer logiquement des conclusions « plausibles » et permet de formuler, ainsi, des hypothèses probables à partir des faits observés – comme c'est le cas lors d'un diagnostic, par exemple. Nous avons vu que Kepler lui-même, lors de son processus démonstratif, est au fait du caractère seulement « plausible » de son système expliquant les phénomènes observés, ce qui ne l'empêche pas de croire en la profonde scientificité de ce qu'il avance. L'intérêt de l'approche abductive réside dans le fait qu'elle permet d'inclure les fondements métaphysiques et théologiques de l'œuvre de Kepler au sein de son entreprise scientifique, et de les réinterpréter comme des prémisses logiques au cœur d'un raisonnement dont la logique interne reste toutefois encore à élucider. Car s'il est de plus en plus reconnu que l'abduction semble jouer un rôle important, voire crucial dans l'interprétation théorique des données expérimentales, la façon dont elle remplit ce rôle fait toujours l'objet de vifs débats. D'une part, on ne comprend pas encore très bien sa nature logique (par exemple, ce qui la distingue clairement de l'induction, ou encore, d'une simple intuition) ; d'autre part, on ne parvient pas à trouver son véritable point de départ (données expérimentales ou appareil analytique) ni à la comprendre en tant que processus ou méthode ; enfin, son statut démonstratif, se situant entre « plausible » et « probable », a des répercussions sur les questions de validité et de discrimination parmi les différents candidats au modèle standard de la théorie scientifique. Mais bien qu'elle ne fasse pas l'objet d'un consensus, je crois que la notion d'abduction peut être fort pertinente pour nous aider à interpréter l'itinéraire rationnel de Kepler en ce qu'elle nous donne des outils prometteurs pour mieux comprendre la dialectique entre théorie et observations empiriques. Nous procéderons d'ailleurs à la critique de certaines reconstructions logiques qui ont été proposées pour interpréter précisément les recherches exposées dans *Astronomia nova*. Inversement, je crois que de se pencher sur la façon la plus juste de reconstruire logiquement la démarche scientifique de Kepler peut également éclairer la philosophie des sciences contemporaine en fournissant un exemple particulièrement instructif d'une production féconde et rationnelle d'hypothèses explicatives.

Bien qu'elle ait été proposée et conceptualisée par Peirce, la notion d'abduction renvoie à un type de raisonnement qu'il est possible de retrouver chez ceux qui se sont intéressés à la méthode scientifique, plus précisément à la génération d'hypothèses plausibles

et non seulement à leur justification⁴⁹⁸. Peirce lui-même retrouve une étude de ce type de raisonnement chez Aristote. Il me semble important, avant de voir comment s'articule la notion d'abduction selon les auteurs contemporains, de tirer de la tradition quelques conceptions quant à cette production d'hypothèses explicatives plausibles. On peut noter que, en raison de la nature éloignée de son objet, l'étude des phénomènes célestes (qu'ils soient atmosphériques ou astronomiques) se prête particulièrement bien à ce type d'inférence plausible : comme il est impossible d'isoler en laboratoire la Lune, de procéder à des expériences répétables et contrôlées sur les comètes (même si certains phénomènes peuvent se répéter) ou d'observer directement certains corps célestes, le scientifique doit faire preuve de beaucoup d'imagination et de suppositions pour proposer un système explicatif acceptable dans ce domaine. Ainsi, l'importance de la pensée spéculative de même que le statut « possible » ou « plausible » de l'*explanans* sont présents dans les trois approches quant à la méthode employée pour générer des hypothèses acceptables qui rendent compte des phénomènes célestes que nous verrons dans ce chapitre. Nous débuterons (5.1) avec la méthode proposée par Platon dans le *Timée*, avant de voir ensuite (5.2) la méthode mentionnée dans les *Météorologiques* d'Aristote, que nous compléterons en nous penchant sur sa notion d'*apagôgê* élaborée dans les *Premiers analytiques*. Nous terminerons avec (5.3) la théorie des explications multiples dans la science épicurienne, proposée dans le cas des phénomènes météorologiques, dont plusieurs éléments peuvent être intégrés au débat sur l'abduction.

5.1. La méthode du *Timée* de Platon

En lisant le *Timée*, ce dialogue platonicien consacré à la nature et à l'origine de l'univers, nous pouvons remarquer que tout ce qui y est exposé l'est sur le mode de la vraisemblance :

Si donc, Socrate, en bien des points, sur bien des questions, touchant les Dieux et la genèse de l'Univers, nous ne venons point à bout de remettre des explications en tous points totalement d'accord avec elles-mêmes, ni poussées à la dernière exactitude, n'en sois point étonné ; mais si cependant nous en apportons qui ne le cèdent en **vraisemblance** à aucune autre, il s'en faut contenter, nous souvenant que

⁴⁹⁸ La distinction prescrite par REICHENBACH (1938) entre contexte de découverte et contexte de justification est ainsi atténuée : l'abduction consiste à inférer l'hypothèse la plus probable pour expliquer un phénomène.

moi qui parle et vous qui êtes juges, nous sommes d'**humaine nature**, de sorte que si, en ces matières, on nous offre une **vraisemblable histoire**, il ne sied pas d'aller chercher plus loin.⁴⁹⁹

Nous avons déjà mentionné, précédemment⁵⁰⁰, que pour Platon le monde des Idées est supérieur au monde sensible, celui-ci étant une pâle copie du premier. S'il existe une méthode chez Platon pour se libérer du monde sensible et accéder à la connaissance des Idées, méthode appelée dialectique⁵⁰¹ et formant une véritable science selon Platon, elle ne semble pas pouvoir s'appliquer ici, pour la connaissance de l'univers. En effet, la nature ou l'univers est une image, une copie de ce qui est immuable, et par conséquent il relève du domaine du « devenir » et non de l'« être » ; c'est pourquoi le discours portant sur l'univers sera « croyable », vraisemblable, et non « certain »⁵⁰². C'est donc dire que l'univers ne peut faire l'objet d'une véritable science selon Platon. On pourrait objecter que l'on peut tout de même parvenir à accéder au modèle de la création, en prenant comme point de départ l'observation de la nature. La raison de cette insuffisance est toutefois exposée dans l'extrait ci-haut : contrairement à la nature divine, notre nature humaine nous empêche de procéder à cette dialectique pour l'univers, dont la connaissance de l'origine nous est inaccessible. C'est pour la même raison que, plus loin, alors que Timée traite de la combinaison des couleurs et de ses répercussions sur le sens de la vue, le recours à l'expérience est proscrit :

Mais les [*sc.* les mélanges de couleurs] vouloir éprouver au **contrôle de l'expérience**, ce serait méconnaître la **différence de l'humaine et de la divine nature** : car un dieu, pour rassembler la pluralité dans l'unité et, inversement, de l'unité tirer par analyse la pluralité qu'il faut, possède savoir et pouvoir ; tandis que parmi les hommes nul n'est capable ni de l'une, ni de l'autre de ces opérations, ni ne le sera jamais à l'avenir.⁵⁰³

Cette mise en garde contre le recours à une méthode expérimentale doit se comprendre comme le rejet d'un procédé consistant à reconstruire la nature, comme on le ferait aujourd'hui en laboratoire, afin d'en tirer la Forme intelligible. Seuls les dieux peuvent opérer la dialectique

⁴⁹⁹ *Timée*, 29c-d ; PLATON (1950), trad. L. Robin, p. 445. Je souligne.

⁵⁰⁰ Au chapitre 3 de cette thèse.

⁵⁰¹ La notion de dialectique chez Platon est exposée notamment dans le *Sophiste*, le *Phèdre* et la *République*.

⁵⁰² *Cf. Timée*, 29b-c.

⁵⁰³ *Timée*, 68d ; PLATON (1950), trad. L. Robin, p. 493. Je souligne

nécessaire pour saisir directement la Forme du monde. Néanmoins, il ne nous est pas interdit, à nous humains, de nous approcher de cette vérité grâce à notre raison.

Une façon de remonter jusqu'à cette compréhension de la nature est de procéder à des suppositions, ou de proposer des principes généraux, et d'utiliser notre raison pour spéculer sur ce qui a pu précéder l'existence du monde. Brisson et Meyerstein y voient une manifestation de ce qui allait devenir la méthode hypothético-déductive en sciences :

Platon, dans le *Timée*, fait usage, ne fût-ce que de façon implicite, de ce qui va devenir « la » méthode utilisée pour toute recherche qui se prétend scientifique. Cette méthode exige que soit au préalable dressée une liste de présupposés ou d'axiomes. Cette liste établie, on cherche à vérifier si, en se fondant sur des règles d'inférence qu'on suppose acceptées et connues, les propositions qu'on arrive à déduire des axiomes présentent une correspondance convenable et raisonnable avec les données de l'observation.⁵⁰⁴

L'usage d'une telle méthode hypothético-déductive est effectivement fort implicite en ce que Platon ne procède pas vraiment à la comparaison avec les observations et ne semble pas accorder une grande importance à ces dernières pour la validation de ses principes. Il semble plutôt que, en vertu de la nature physique et matérielle de l'univers, il soit impossible d'en obtenir un discours scientifique et que l'on puisse seulement spéculer sur les principes le gouvernant. Évidemment, si l'on peut réfuter l'un de ces principes, il faudra le rejeter, comme c'est le cas par exemple pour l'affirmation selon laquelle le triangle équilatéral est le plus beau de tous les triangles et doit ainsi être un constituant des éléments : « mais à qui y fera reproche et de ses dires révélera le bien-fondé, nous remettrons amicalement le prix. »⁵⁰⁵ Le discours vraisemblable pourra être tenu aussi longtemps qu'il n'est pas réfuté, mais cette réfutation ne se fera pas nécessairement sur une base observationnelle.

Il y aurait beaucoup de remarques intéressantes et plus approfondies à faire sur le *Timée*, mais nous nous en tiendrons là puisque nous avons déjà en main l'essentiel pour cette section de ma thèse : le discours sur l'univers est essentiellement spéculatif et vraisemblable selon Platon.

⁵⁰⁴ BRISSON et MEYERSTEIN (1991), p. 10.

⁵⁰⁵ *Timée*, 654b ; PLATON (1950), trad. L. Robin, pp. 474-475.

5.2. Les voies anagogique et apagogique d'Aristote

Contrairement à Platon, Aristote accorde au monde sensible un statut ontologique très important. À partir des observations recueillies par nos sens, il est possible d'obtenir une connaissance de la nature en mouvement, du moment que cette science soit qualitative (et non quantitative). Cette connaissance, à partir de l'expérience sensible, fait appel également à un travail de la raison, via les syllogismes, et implique en outre une étude des opinions les plus répandues, les *endoxa*. Dans les *Météorologiques*, Aristote s'exprime ainsi alors qu'il s'apprête à fournir l'explication des comètes :

Puisque, au sujet des **faits invisibles** à la sensation, nous estimons avoir fourni par le **raisonnement** des démonstrations suffisantes du moment que nous les avons ramenés au **possible** < *eis tò dunatòn anagágômen* > – et aussi d'après ce qui est effectivement **visible**, on peut concevoir que c'est surtout de la manière suivante qu'elles [*sc.* les comètes] adviennent.⁵⁰⁶

Les « faits invisibles » dont il est question font référence ici à ce qui se produit dans la nature mais qui est hors de la portée de nos sens. Selon Aristote, le travail de la raison, conjugué avec ce qui nous est visible, nous permet d'obtenir pour ces faits invisibles des explications possibles – et non certaines, ce qui est suffisant pour cette tâche. Le verbe utilisé, *an-ágô*, a le sens de se conduire de bas en haut : il s'agit donc de remonter, à partir des phénomènes et à l'aide de la raison, vers des principes possibles. Si une science des objets éloignés de la portée de nos sens est ici possible, elle n'en génère pas moins une connaissance simplement possible et non certaine. Le commentateur et traducteur Jocelyn Groisard note, au sujet de ce passage ci-haut, les importantes implications épistémologiques : « le travail explicatif serait ainsi de ramener les phénomènes à des processus inapparents et ces derniers, par le raisonnement, au possible, la météorologie mettant ainsi en œuvre une coopération étroite entre observation et spéculation »⁵⁰⁷. Cette coopération entre ces deux tâches se retrouve également dans le traité *Du ciel*, où Aristote propose à la fois des arguments tirés de l'observation, et d'autres de la logique, pour prouver par exemple que le monde est sphérique⁵⁰⁸.

⁵⁰⁶ *Météorologiques*, I, 7, 344a5-8 ; ARISTOTE (2008), trad. J. Groisard, p. 125. Je souligne.

⁵⁰⁷ Note 2 de J. Groisard, dans ARISTOTE (2008), p. 125.

⁵⁰⁸ Cf. *Du ciel*, II, 4.

L'inférence plausible est également présente chez Aristote alors qu'il traite expressément des syllogismes. Dans ses premières réflexions au sujet de l'abduction, Peirce fait référence au type de raisonnement chez Aristote appelé « *apagôgê* », qui se distingue de la déduction et de l'induction : « There are in science three fundamentally different kinds of reasoning, Deduction (called by Aristotle *synagoge* or *anagoge*⁵⁰⁹), Induction (Aristotle's and Plato's *epagoge*) and Retrodution (Aristotle's *apagoge*). »⁵¹⁰ Chez Aristote, l'*apagôgê* est traitée notamment dans les *Premiers analytiques*, où elle renvoie à un syllogisme dont la prémisse mineure est incertaine ; on peut alors s'approcher de la vérité, sans l'atteindre nécessairement⁵¹¹. L'*apagôgê* est un terme habituellement traduit par « abduction », mais selon Peirce, il s'agit d'une mauvaise traduction car il vaut mieux parler de rétroduction pour cette troisième inférence, qu'il définit ainsi :

Retrodution is the **provisional adoption of a hypothesis**, because every possible consequence of it is capable of experimental verification, so that the persevering application of the same method may be expected to reveal its disagreement with facts, if it does so disagree.⁵¹²

La rétroduction consiste ici, pour Peirce, à adopter une hypothèse de façon provisoire en vertu du fait qu'elle n'a pas été encore réfutée à partir de ses conséquences observationnelles. Mais comme le remarque le philosophe Ilkka Niiniluoto, ce type d'inférence finira par être appelé « induction » par Peirce⁵¹³. Éventuellement, la troisième inférence à distinguer de la déduction et de l'induction sera chez Peirce le fait de générer une hypothèse explicative, permettant ensuite, par déduction, de conclure aux observations (selon le syllogisme du pourquoi, tel que vu au chapitre 3), hypothèse adoptée ensuite par induction. Dans le cas du syllogisme, cette inférence consiste donc à inférer la mineure même (et non pas à l'inclure dans les prémisses, comme dans l'*apagôgê*), processus auquel fait référence Aristote dans les *Seconds analytiques* dans ce passage :

La vivacité d'esprit est le don d'atteindre le moyen terme dans un temps imperceptible, par exemple si l'on voit que la Lune a toujours son côté brillant

⁵⁰⁹ L'emploi du terme *anagoge* par Peirce est critiquable ici.

⁵¹⁰ PEIRCE (1931-1958), vol. 1, § 65.

⁵¹¹ Cf. *Premiers analytiques*, II, 25.

⁵¹² PEIRCE (1931-1958), vol. 1, § 68. Je souligne.

⁵¹³ NIINILUOTO (1999), p. 241.

tourné vers le Soleil, on comprend vite la cause de cela, à savoir qu'elle reçoit sa lumière du Soleil [...].⁵¹⁴

C'est bien cette inférence (ici rapportée à un don si nous y arrivons rapidement) à l'*explanans*, à partir de l'observation des *explananda*, qui correspond au processus permettant de générer une hypothèse explicative et qui constitue un type d'inférence réellement différent de l'induction.

5.3. La théorie des explications multiples dans la science épicurienne

La dernière approche épistémologique que je vais présenter concernant l'étude des phénomènes célestes et le statut de leurs hypothèses explicatives est celle des Épicuriens. Ces derniers ont développé, pour les phénomènes météorologiques⁵¹⁵, une théorie des explications multiples qui conjugue à la fois un empirisme fort, un dogmatisme quant aux principes de la physique et la possibilité de concevoir un éventail de théories concurrentes pour expliquer les phénomènes météorologiques. Elle relève notamment le défi d'accepter une multiplicité d'hypothèses différentes pour un même phénomène sans tomber dans le relativisme, et de préciser en quel sens ces hypothèses sont « vraies » ou « vraisemblables », selon le point de vue envisagé. Cette approche étant beaucoup moins connue que les deux précédentes, elle mérite que l'on s'y attarde davantage afin de la reconstruire adéquatement. Nous pourrions ensuite y puiser plusieurs éléments utiles pour notre étude du raisonnement abductif au sein de la méthode képlérienne.

L'objectif de l'étude épicurienne de la nature : l'ataraxie

Tout d'abord, la philosophie épicurienne est reconnue pour être fortement dogmatique. Contrairement aux sceptiques, les écoles épicuriennes enseignaient des principes fondamentaux, notamment celui selon lequel l'univers est entièrement composé d'atomes et de

⁵¹⁴ *Seconds analytiques*, I, 34, 89a10-13 ; ARISTOTE (2005), trad. P. Pellegrin, p. 237. Que ce passage réfère à l'abduction peircienne est également l'opinion de NIINILUOTO (1999), p. 241.

⁵¹⁵ Le terme « météorologie » et l'adjectif « météorologique » est employé ici pour parler de l'étude des corps ou phénomènes célestes (en grec, *météorología*, étude des *météoros*) et non uniquement des phénomènes atmosphériques.

vide. Ce principe est au fondement non seulement de leur physique, mais de leur éthique aussi, qui oriente tous les éléments de leur philosophie vers le plaisir défini comme absence de trouble de l'âme. C'est dans cet esprit qu'Épicure nous informe de l'objectif de l'étude des phénomènes célestes, dès le début de la *Lettre à Pythoclès* :

Il faut se persuader tout d'abord que la connaissance des phénomènes du ciel, qu'on les considère en connexion avec d'autres ou indépendamment, n'a d'autre fin que **l'ataraxie et une ferme confiance** < *ataraxian kai pistin bébaion* > , comme aussi toutes les autres recherches.⁵¹⁶

Dans l'expression que j'ai soulignée, le premier terme de ce couple, l'ataraxie, correspond à la définition épicurienne du plaisir pour l'âme : l'absence de trouble⁵¹⁷. La connaissance (des phénomènes célestes comme du reste) est ici recherchée essentiellement parce qu'elle est nécessaire à l'obtention du plaisir, qui est la visée principale de la philosophie d'Épicure, telle que prescrite par son éthique. Comment la connaissance peut-elle nous apporter la tranquillité visée? Les textes épicuriens comportent plusieurs passages où il nous est dit que l'étude de la nature nous permet d'apaiser les peurs qui pourraient perturber notre âme. Dans son *De rerum natura*, Lucrèce compare les peurs des hommes aux terreurs que vivent les enfants dans le noir : « Ces terreurs, ces ténèbres de l'âme, il faut les dissiper. Le soleil ni l'éclat du jour ne les transperceront, mais la vue et l'explication de la nature. »⁵¹⁸ Les différentes peurs qui nous envahissent sont diverses, telles la peur de la mort ou la peur du châtement divin. Le dogme atomiste des Épicuriens, puisqu'il rejette toute intervention divine dans l'explication de la nature, permet de calmer notre âme et de fournir des réponses apaisantes à ses questions existentielles, en lui permettant de se débarrasser rationnellement de la crainte des dieux. Les Épicuriens accordent donc une valeur instrumentale à l'étude de la nature, envisagée comme un moyen subordonné à la volonté prescrite par l'éthique, qui est d'atteindre le plaisir. En ce sens, une connaissance générale sera parfois suffisante pour nous apaiser. On le voit bien dans cet extrait de la *Lettre à Hérodote* :

⁵¹⁶ *Lettre à Pythoclès*, 85 ; ÉPICURE (1987), trad. M. Conche, p. 191. Je souligne.

⁵¹⁷ On retrouve cette définition notamment dans la *Lettre à Ménécée*, 131 : « Quand donc nous disons que le plaisir est la fin, nous ne parlons pas des plaisirs des gens dissolus et de ceux qui résident dans la jouissance, [...] mais du fait, pour le corps, de ne pas souffrir, pour l'âme, de n'être pas troublée. » ÉPICURE (1987), trad. M. Conche, p. 223.

⁵¹⁸ *De rerum natura*, III, 90-93 ; LUCRÈCE (1993), trad. J. Kany-Turpin, pp.185-187.

Si donc nous pensons qu'un phénomène admet de se produire d'une certaine façon, et dans les conditions dans lesquelles il est également possible d'être sans trouble, sachant qu'il se produit **de plusieurs façons**, nous serons sans trouble comme si nous savions qu'il se produit d'une certaine façon.⁵¹⁹

Ce passage nous montre que du point de vue de l'ataraxie, connaître une multiplicité de causes possibles pour un phénomène revient au même que si nous connaissions la cause exacte. Si nous savons que la cause d'un phénomène fait partie d'un sous-ensemble de causes possibles qui excluent toute intervention divine, nous sommes apaisés. S'acharner à saisir exactement quelle explication précise est inutile du point de vue de l'hédonisme radical d'Épicure puisqu'il ne s'agit que d'une perte de temps⁵²⁰ qui n'augmente en rien l'apaisement de l'âme. En ce qui concerne le trouble causé par la peur ressentie face aux phénomènes célestes, il suffit pour l'apaiser d'avoir une connaissance négative⁵²¹, c'est-à-dire de savoir qu'ils ne sont pas l'œuvre des dieux.

Le deuxième terme du couple souligné dans le passage exprimant l'objectif de la science épicurienne, la « ferme confiance », désigne l'état de certitude dans lequel nous nous trouvons lorsque nous faisons appel à notre perception sensible. Cette explication se retrouve clairement énoncée dans un passage de la *Lettre à Hérodote*, dont nous ne retranscrivons que le début : « Après cela, il faut considérer, en se référant aux sensations et aux affections – ainsi aura-t-on la confiance la mieux fondée < *bébaiotátê pístis* >[...]. »⁵²² Chez Épicure, la sensation est le critère de vérité, c'est-à-dire que toutes nos sensations sont vraies et constituent le fondement de notre connaissance. Cela classe les Épicuriens du côté des philosophes empiriques, selon lesquels toute connaissance résulte de l'expérience sensible. Cette position épistémologique a des répercussions sur l'étude de la nature, en ce que les perceptions sensorielles sont également le point de départ de cette connaissance. Pour l'étude des objets célestes, le témoignage des sens consistera essentiellement en des sensations visuelles, qu'il faudra considérer comme vraies et indubitables. Les explications théoriques devront rendre compte de ces observations, qui ne seront pas mises en doute.

⁵¹⁹ *Lettre à Hérodote*, 80 ; ÉPICURE (1987), trad. M. Conche, p. 123. Je souligne.

⁵²⁰ Comme le remarque SALEM (1997), p. 84.

⁵²¹ Je m'inspire ici d'un commentaire de M. Conche, note 1 dans ÉPICURE (1987), p. 184.

⁵²² *Lettre à Hérodote*, 63 ; ÉPICURE (1987), trad. M. Conche, p. 113.

Mais on s'en doute, le domaine des sensations obtenues dans la vie de tous les jours et celui des observations visuelles des cieux diffèrent grandement en termes de clarté et de précision. La méthode scientifique des Épicuriens tient d'ailleurs compte de la particularité propre aux phénomènes « cachés ».

Vers une étude de l'inévident

Lorsqu'il expose les principes de sa méthode, Épicure affirme qu'il faut suivre les sensations, et ce tant pour les phénomènes qui relèvent directement de l'expérience sensible que les choses qui sont du domaine de l'invisible, de l'inévident :

De plus, il faut observer toutes choses d'après les sensations [...], afin que nous ayons de quoi procéder à partir de signes à des inférences au sujet de ce qui attend confirmation et de l'invisible < *tò prosménon kai tò adèlon* >.⁵²³

Le premier terme, *prosménon*, désigne les phénomènes qui peuvent être directement appréhendés par l'expérience sensible et qui sont éventuellement amenés à être vérifiés de plus près, en examinant s'ils sont ou non attestés par l'évidence. Par exemple, lorsque Platon est vu de loin, on peut déjà conjecturer l'opinion à l'effet que c'est lui; mais il faut que la distance soit diminuée pour en avoir la confirmation⁵²⁴ (*epimarturèsis*) et ainsi en établir la vérité. En revanche, si après coup nous découvrons que ce n'est pas Platon, il y a non-confirmation (*ouk epimarturèsis*) de l'opinion et celle-ci est donc fausse.

Lorsque les choses recherchées ne sont pas directement appréhendables par l'expérience, lorsqu'elles font partie des choses cachées, invisibles, ne tombant pas directement sous les sens mais relevant de l'*adèlon*, il faut encore une fois procéder à partir des évidences sensibles. Pour ce faire, il faut cette fois poser un lien de conséquence (ce que Sextus désigne par le terme « *akolouthia* »)⁵²⁵ entre l'opinion que nous formons et les éléments de preuve sensibles qui en résulteraient. Si un désaccord survient entre ces éléments de preuve éventuels et nos observations, l'opinion est infirmée (*antimarturèsis*) et est rejetée comme fausse. Si par contre les éléments de preuve sensibles ne contredisent pas ceux qui

⁵²³ *Lettre à Hérodote*, 38 ; ÉPICURE (1987), trad. M. Conche, p. 101.

⁵²⁴ L'exemple se retrouve chez Sextus Empiricus, *Contre les professeurs*, VII, 211-216, cité dans LONG & SEDLEY (2001), vol. I, pp. 187-189.

⁵²⁵ Sur le fondement de cet *akolouthia*, cf. MOREL (2000), p. 115.

résultent de l'opinion, cette dernière est dite vraie en vertu du fait qu'il y a non-infirmité (*ouk antimarturèsis*). C'est donc un véritable système hypothético-déductif que nous obtenons ici. Nous pourrions reconstruire logiquement ces méthodes propres à l'*adèlon* de la façon suivante, en posant H comme l'hypothèse à vérifier, et P la conséquence observable :

a) infirmité (*antimarturèsis*) :

1. $H \Rightarrow P$;
2. $\neg P$;
3. Donc $\neg H$.

b) non-infirmité (*ouk antimarturèsis*) :

1. $H \Rightarrow P$;
2. $\neg \neg P$;
3. Donc $\neg \neg H$.

L'*antimarturèsis* agit donc à la manière d'un *modus tollens*, qui réfute l'antécédent par la négation du conséquent, alors que l'*ouk antimarturèsis* consiste à démontrer qu'il n'y a pas eu de telle réfutation. Quant à cette non-infirmité, on pourrait aussi l'interpréter comme étant également un *modus tollens*, qui démontrerait la fausseté de l'hypothèse contradictoire⁵²⁶, ce qui serait logiquement équivalent à ce qui est en « b » ci-dessus, et logiquement valide du moment que l'hypothèse contradictoire « $\neg H$ » soit définie ainsi : « $\neg H \Rightarrow \neg P$ ».

Épicure utilise cette méthode pour affirmer la vérité de l'existence du vide⁵²⁷ : le vide, qui est l'invisible, l'*adèlon* par excellence, entraîne comme conséquence, dans le monde sensible, la présence du mouvement. L'existence du vide serait donc infirmée si le mouvement n'était pas observé ; mais comme ce n'est pas le cas, il s'agit d'un cas de *ouk antimarturèsis* et l'opinion selon laquelle le vide existe est reconnue comme vraie.

Pour que soit posée la vérité de la conclusion H de façon logiquement valide à partir de P , le raisonnement par non-infirmité doit inclure, dans ses prémisses, une implication logique de type « $P \Rightarrow H$ », ou encore, la relation d'équivalence « $H \Leftrightarrow P$ ». Nous pouvons croire qu'une telle relation est implicite si le phénomène P n'accepte qu'une seule explication possible, H , c'est-à-dire si l'observation de P ne peut pas être générée autrement que par

⁵²⁶ C'est notamment l'opinion de SALEM (1997), p. 23 et de M. Conche, dans ÉPICURE (1987), p. 36.

⁵²⁷ Je retrace la méthode d'Épicure telle qu'elle est résumée par Sextus empiricus. Cf. *Contre les professeurs*, VII, 211-216, cité dans LONG & SEDLEY (2001), vol. I, pp. 187-189.

l'action de *H*. Mais ce ne sont pas tous les phénomènes qui fonctionnent de cette façon. Ainsi, les phénomènes célestes acceptent une multitude d'explications concurrentes en accord avec les phénomènes (de type H_1, H_2, H_3, \dots). Dans ce cas, la méthode de non-infirmité s'applique respectivement à H_1, H_2, H_3, \dots et conclut à la vérité de chacune d'elles. Logiquement, on obtient alors un raisonnement de ce type-ci :

c) non-infirmité (*ouk antimarturèsis*) d'un phénomène à explications multiples:

1. $H_1 \Rightarrow P$;
- 1'. $H_2 \Rightarrow P$;
- 1''. $H_3 \Rightarrow P$;
-
2. $\neg P \Rightarrow \neg H_1, \neg H_2, \neg H_3, \dots$
3. $\neg \neg P$;
4. Donc $\neg \neg H_1, \neg \neg H_2, \neg \neg H_3, \dots$

Le critère selon lequel une théorie doit être acceptée si elle s'accorde avec les phénomènes nous amène à distinguer deux cas de figure : soit lorsqu'une seule explication est possible, ou soit lorsqu'une pluralité d'alternatives se présentent, toutes en accord avec les preuves empiriques qui s'ensuivent. Cette différence est mise en valeur dès les premières pages de la *Lettre à Pythoclès*, où le deuxième cas de figure est attribué aux phénomènes célestes :

Il ne faut pas vouloir forcer l'impossible, ni avoir à l'égard de toutes choses une théorie semblable aux raisonnements sur les genres de vie, ou à ceux concernant la solution des autres problèmes physiques, par exemple que le tout est corps et nature intangible, ou que les éléments sont insécables et toutes les choses du même genre qui n'ont qu'une seule façon de s'accorder avec les phénomènes, ce qui n'est pas le cas pour les **phénomènes du ciel** <*meteôrôn*>, lesquels admettent **plusieurs** <*pleonachèn*> **causes de leur production** et plusieurs déterminations de leur essence **en accord avec les sensations** <*tais aisthèsesi sùmphonon*>. ⁵²⁸

Dans cet extrait, Épicure explique la distinction entre les explications uniques et multiples. Dans le premier cas, une seule explication est en accord avec les phénomènes, c'est-à-dire qu'une seule opinion a des conséquences sensibles qui ne sont pas infirmées par ce l'on

⁵²⁸ *Lettre à Pythoclès*, 86 ; ÉPICURE (1987), trad. M. Conche, p. 191. Je souligne.

observe dans le monde. C'est de cette façon qu'ont été établis les principes de base de la physique épicurienne (tel l'atomisme) et qu'ils ont été érigés comme dogmes. Épicure nous dit que les phénomènes célestes sont plutôt à ranger dans la deuxième catégorie, celle qui permet un éventail d'explications possibles pour les mêmes preuves empiriques. De nombreux exemples de cette méthode se retrouvent tant dans la *Lettre à Pythoclès* d'Épicure que dans le livre V du *De rerum natura* de Lucrèce. Dans ces passages, une série d'explications possibles sont énumérées pour chaque phénomène météorologique, sans que les auteurs ne tranchent en faveur de l'une ou l'autre d'entre elles. Par exemple, pour expliquer les phases de la lune, Lucrèce mentionne au moins quatre explications qui pourraient rendre compte des phénomènes, soit la réflexion des rayons solaires, l'interférence d'un corps invisible, le tournoiement de la lune ayant une face claire et l'autre sombre, et l'apparition d'une nouvelle lune naissante jour après jour⁵²⁹. Pour ce même phénomène, Épicure mentionne notamment la rotation de la lune, les configurations de l'air et les occultations⁵³⁰, mais il prend soin de nous dire que ces diverses explications « nous invitent à rendre compte de ce changement d'aspect, si du moins, s'étant épris de la méthode de l'explication unique, et d'une unique explication, on ne rejette pas les autres à la légère [...]. »⁵³¹ L'important est donc de reconnaître, lorsque l'on étudie les phénomènes météorologiques, qu'une pluralité d'explications doit être acceptée, et non pas une, comme c'était le cas pour les principes de base de la physique. Néanmoins, il n'est pas nécessaire pour Épicure d'énumérer au complet tous les éléments de la liste d'explications possibles. Même le nombre d'explications demeure vague. On le voit bien dans un autre extrait de la *Lettre à Pythoclès*, lorsque Épicure, après avoir envisagé trois hypothèses pouvant expliquer le phénomène des étoiles filantes, cesse là sa recherche : « Et il y a d'autres manières par lesquelles ce résultat peut être obtenu sans recourir aux mythes <amuthètoi> ». ⁵³² Comme nous l'avons vu plus haut, il n'est pas nécessaire pour notre ataraxie de s'attarder plus longuement à cette liste, du moment que l'on sait que l'explication vraie fait partie d'un ensemble d'explications qui ne font pas référence à l'intervention divine.

Cet empirisme fort pousse Épicure à affirmer qu'il serait totalement non scientifique de ne pas accepter cette pluralité d'explications :

⁵²⁹ Cf. *De rerum natura*, V, 705-750.

⁵³⁰ Cf. *Lettre à Pythoclès*, 94.

⁵³¹ *Lettre à Pythoclès*, 94 ; ÉPICURE (1987), trad. M. Conche, p. 197.

⁵³² *Lettre à Pythoclès*, 115 ; ÉPICURE (1987), trad. M. Conche, p. 211.

Donner de ces faits une seule cause, alors que les phénomènes en appellent plusieurs, est insensé, et c'est la pratique inadéquate des zéloteurs de la vaine astronomie, qui donnent dans le vide les causes de certains phénomènes, du moment qu'ils ne libèrent jamais la nature divine de telles fonctions.⁵³³

La science épicurienne, tant par son but que par sa méthode, exige donc que l'on accepte toutes les explications dont les conséquences dans le domaine sensible sont en accord avec les phénomènes. Un problème important d'incohérence logique⁵³⁴ risque alors de se présenter. Si aussi bien H_1 , H_2 , que H_3 sont reconnues comme vraies en vertu du fait qu'elles entraînent des éléments de preuve sensibles qui ne les contredisent pas, est-ce à dire qu'elles sont toutes vraies en même temps? Le problème n'aurait pas lieu si on attribuait uniquement le statut de possibilité ou de plausibilité à ces explications. Néanmoins, si on applique rigoureusement la méthode de la *ouk antimarturèsis*, il faut bel et bien attribuer la valeur de vérité à chacune d'entre elles. Or cela semble impossible logiquement puisque certainement plusieurs de ces hypothèses sont inconsistantes entre elles. Lorsque Lucrèce ou Épicure énumèrent les différentes explications possibles pour un phénomène météorologique, on voit bien qu'il s'agit d'hypothèses concurrentes. Il est irrecevable que l'on attribue la valeur de vérité « vraie » à toutes ces hypothèses sans tomber dans une contradiction évidente. Pour surmonter ce problème, Lucrèce et Épicure doivent préciser le statut de vérité qu'ils attribuent à ces différentes explications pour éviter une énorme contradiction.

Le statut de vérité des explications multiples

Épicure ne dit pas explicitement que les explications multiples des phénomènes célestes sont toutes « vraies » au sens où elles correspondent toutes à ce qui se passe effectivement dans le ciel. Mais la description de sa méthode scientifique (par non-infirmité) semble aller dans cette voie, si l'on se fie à ce passage de la *Lettre à Hérodote* : « s'il n'est pas confirmé, ou s'il est infirmé, se produit le faux, s'il est confirmé ou n'est pas infirmé, le vrai. »⁵³⁵ Néanmoins, la *Lettre à Pythoclès* ne semble pas affirmer directement la vérité des explications multiples. On y parle plutôt du caractère vraisemblable ou possible de

⁵³³ *Lettre à Pythoclès*, 113 ; ÉPICURE (1987), trad. M. Conche, p. 211.

⁵³⁴ Cf. ASMIS (1984), p. 179.

⁵³⁵ *Lettre à Hérodote*, 51 ; ÉPICURE (1987), trad. M. Conche, p. 107.

telles explications. Nous le voyons bien dans cet extrait : « Or l'on obtient la sérénité la plus grande au sujet de toutes les choses qui s'expliquent d'une façon multiple en accord avec les phénomènes, quand on laisse subsister, comme il convient, ce qui est dit de **vraisemblable** <*pithanologóúmenon*> à leur propos [...]. »⁵³⁶ Une question se pose : en ce qui concerne les phénomènes célestes, la méthode empirique des Épicuriens consistant à générer des explications selon leur accord avec les phénomènes nous mène-t-elle vers la vérité, ce qui risque d'entraîner une incohérence logique, ou la simple possibilité? Pour répondre à cette question, nous pouvons nous inspirer de cette proposition d'Elisabeth Asmis :

[...] in Epicureanism agreement with the phenomena does serve as a criterion of truth; for although only one explanation can be true with respect to any particular event, all multiple explanations are true with respect to the general state of affairs that they serve to explain.⁵³⁷

Il nous est proposé ici de faire une distinction entre un évènement envisagé de façon particulière et un évènement envisagé selon la classe générale dont il fait partie. Selon ce point de vue, un phénomène P_1 possède une multiplicité d'explications vraies au sens où il se range sous une classe générale d'évènements P pour lesquels toutes les explications H_1, H_2, H_3, \dots sont vraies. Néanmoins, envisagé selon sa particularité, P_1 n'a qu'une seule explication, tirée du sous-ensemble $\{H_1, H_2, H_3, \dots\}$ et il en va de même pour chacun des éléments de $\{P_1, P_2, P_3, \dots\}$ pouvant être regroupés sous l'instance générale P . Quant à savoir quelle est précisément l'explication particulière d'un évènement météorologique particulier, la tâche serait trop difficile pour qu'on puisse y arriver avec une ferme confiance ou certitude.

Lucrece énonce l'idée que dans le cas des explications multiples, une seule se produit réellement pour un évènement donné, bien que l'on ne puisse pas aisément l'identifier :

Poser avec certitude laquelle de ces causes agit dans notre monde est tâche difficile, mais **ce qui peut se faire et se fait parmi l'univers**, dans les divers mondes diversement créés, je l'enseigne et m'attache à déployer les causes nombreuses qui parmi l'univers peuvent mouvoir les astres. Entre toutes il n'en est qu'une, en notre monde aussi, qui les mette en mouvement, mais quelle est-elle? Nul ne peut l'enseigner, qui pas à pas progresse.⁵³⁸

⁵³⁶ *Lettre à Pythoclès*, 87 ; ÉPICURE (1987), trad. M. Conche, p. 193. Je souligne.

⁵³⁷ ASMIS (1984), p. 322.

⁵³⁸ *De rerum natura*, V, 526-533 ; LUCRÈCE (1993), trad. J. Kany-Turpin, p. 345. Je souligne.

Ce passage est intéressant pour notre problématique puisqu'il soutient que chacune des multiples explications « peut se faire et se fait parmi l'univers ». Ceci s'accorde parfaitement avec un autre passage où Lucrèce affirme l'existence d'une infinité de mondes engendrés par toutes sortes de collisions et de combinaisons entre l'infinité d'atomes qui composent, avec le vide, l'univers⁵³⁹. Dans ce cas, toutes les explications multiples seraient vraies puisqu'elles peuvent arriver, et donc arrivent effectivement quelque part au sein de l'univers pour un évènement appartenant au même type que celui que l'on tente d'expliquer. Quant à savoir laquelle de ses explications se produit pour cet évènement particulier, on ne peut pas le savoir, du moins au début du processus de celui « qui pas à pas progresse ». Cette précision nous laisse-t-elle croire qu'un progrès scientifique est envisageable? Dans le *De rerum natura*, nous pouvons remarquer que Lucrèce ne semble pas vouloir aller plus loin dans l'investigation des causes des évènements météorologiques. Nous pouvons tout de même imaginer que, avec suffisamment de temps et d'effort, celui qui étudie les phénomènes célestes pourrait parvenir à obtenir un nombre plus élevé d'observations et, ce faisant, pourrait éliminer quelques unes de ces causes possibles (H_1, H_2, H_3, \dots) en utilisant toujours la méthode par *ouk antimarturèsis*. Si une telle entreprise n'est pas à rejeter selon la méthode scientifique épicurienne, elle n'est pas requise étant donné l'objectif de l'étude de la nature. Puisque les explications multiples ne nuisent en rien à l'obtention de l'ataraxie, que l'on ait un petit ou grand nombre d'explications ne change rien du point de vue de la tranquillité de l'âme. Comme le résume M. Conche : « Il [sc. le progrès scientifique] n'est nullement exclu : ce qui est exclu est que cela puisse présenter un intérêt. »⁵⁴⁰

Un peu plus loin dans le *De rerum natura*, Lucrèce compare le procédé d'explications multiples au diagnostic que l'on tente de poser lorsque l'on aperçoit le cadavre d'un homme⁵⁴¹, vu de loin :

Pour quelques faits encore, il ne suffit point de dire une cause, il en faut plusieurs,
parmi lesquelles une seule existe. De même, si tu vois de loin un corps inanimé, il te

⁵³⁹ Cf. *De rerum natura*, II, 1043-1090.

⁵⁴⁰ M. Conche, dans *ÉPICURE* (1987), p. 38.

⁵⁴¹ La théorie des explications multiples n'est donc pas seulement valide pour l'*ádelon*, mais peut convenir aussi pour les ce qui appartient à la classe du *prosménon*, de ce qui peut être investigué et recevoir éventuellement une confirmation empirique. À cet effet, notons que les phénomènes célestes ne semblent pas relever totalement de l'invisible, du moins pas au même titre que le vide, puisque c'est uniquement la distance nous séparant des objets célestes qui nous empêche d'en avoir une expérience sensible directe, et non une impossibilité en soi.

faut énumérer toutes les causes de mort pour que soit dite celle qui frappa cet homme-là. Car tu ne saurais décider s'il a péri par le fer, le froid, la maladie, ou, sait-on jamais, par le poison; mais qu'il lui arriva un accident de ce genre, nous le savons; il faut, dans bien des cas, tenir ce langage.⁵⁴²

Lucrèce réitère l'idée que, lorsque nous sommes éloignés d'un phénomène – ici, la mort d'un homme – nous tirons une liste d'explications possibles parmi lesquelles une seule est vraie. Néanmoins, celui qui observe le cadavre à distance n'est pas totalement ignorant, puisqu'il sait que la cause de sa mort fait partie des explications qu'il a énumérées. Pour reprendre la distinction proposée par Asmis, nous dirions que la mort (M_I) de cet homme-là se range, du point de vue général, sous la catégorie de mort (M) qui, elle, s'explique de plusieurs façons ($H = \{H_1, H_2, H_3, \dots\}$). L'ensemble des explications multiples sont toutes vraies du point de vue général, puisqu'elles sont les seules à pouvoir expliquer la mort de l'homme. Affirmer la vérité des explications multiples revient ici à affirmer trois choses : d'une part, n'importe quel élément de H peut expliquer M , sous lequel se range M_I ; d'autre part, la cause particulière de M_I est un élément de H , même si nous ne pouvons déterminer exactement lequel est opérant dans ce cas-ci ; enfin, chacun des éléments de H a causé – à un moment ou un autre, au sein de l'infinité des mondes – la mort M d'un homme. Les éléments de H sont donc tous vrais, mais ils ne s'appliquent jamais en même temps au même événement particulier, de sorte que le risque d'incohérence logique est complètement écarté.

Explications multiples et abduction

La méthode scientifique des Épicuriens, nous l'avons vu, conjugue un empirisme (très) fort, point de départ de la connaissance, à un raisonnement spéculatif qui se contente de générer un ensemble H pouvant engendrer les conséquences observationnelles P . Nous avons vu qu'en vertu de leur empirisme fort, qui se déploie selon une méthode de non-infirmité, les Épicuriens affirment que tout H s'accordant avec les phénomènes doit être reçu comme vrai. Pour éviter l'incohérence logique, les Épicuriens proposent d'entendre ce « vrai » non pas comme la vérité particulière de chacune de ces hypothèses (H_1, H_2, H_3, \dots) expliquant un phénomène particulier P_I , ce qui risquerait d'entraîner effectivement une incohérence logique

⁵⁴² *De rerum natura*, VI, 703-711 ; LUCRÈCE (1993), trad. J. Kany-Turpin, p. 435.

si certaines de ces H sont contradictoires, mais plutôt d'envisager les phénomènes particuliers sous leur instance générale P et de faire de même pour les hypothèses ; ainsi, on sait qu'une hypothèse de type H a assurément causé P_1 puisque ce dernier fait partie de P , ensemble des conséquences des éléments de H .

Si l'on abandonne la fonction purement ataraxique de la science épicurienne et que l'on cherche à déterminer laquelle de ces H , sous sa forme particulière, est la vraie pour expliquer P_1 , on pourrait dire alors que H_1 , H_2 , H_3 ou tout autre élément de H est vraisemblable, ayant déjà causé un phénomène de type P . Cela pourrait nous donner une stratégie nous permettant de proposer différents candidats à l'explication vraie. Nous avons vu aussi que Lucrèce emploie l'exemple du diagnostic pour la mort d'un homme ; or le diagnostic est fréquemment utilisé pour désigner l'inférence abductive. Il nous donne alors la méthode pour procéder à cette inférence : instancier P_1 sous un ensemble P , énumérer toutes les causes possibles de type $H_1 \Rightarrow P$, $H_2 \Rightarrow P$, $H_3 \Rightarrow P$, ... ; il suffit ensuite de les réunir sous H et de conclure que c'est l'un de ses éléments qui a été particulièrement à l'œuvre, seule certitude que nous puissions avoir. L'étape suivante, qui nous écarterait de la certitude, pourrait être de se donner un critère pour choisir, parmi tous les H possibles, la meilleure explication ; c'est là une des tâches de l'abduction, qui n'a d'autre choix que de générer une conclusion uniquement vraisemblable lorsqu'envisagée de façon particulière. C'est d'ailleurs en vertu de cette exigence de plausibilité que la méthode de non-infirmité par les données observationnelles, présentée de façon explicite chez les Épicuriens, est une condition nécessaire pour l'inférence abductive : nous verrons que pour certains, elle semble même être une condition suffisante.

Explications multiples et méthode képlérienne

Les conceptions épistémologiques de Kepler ne sont pas les mêmes que celles des Épicuriens, entre autres parce que la sensation n'est pas pour lui la source même de la connaissance. Nous avons vu que Kepler a tout de même été confronté au même problème que les Épicuriens quant à la concordance des hypothèses et des données observationnelles⁵⁴³. En

⁵⁴³ Problème abordé à la section 2.4 de cette thèse.

effet, en vertu de sa conception selon laquelle le monde physique est créé à l'image de son créateur selon les archétypes, la concordance entre les hypothèses et les phénomènes (ce qui revient à la *ouk antimarturèsis* des Épicuriens) est une condition essentielle chez Kepler, quoique non suffisante, pour la justification des hypothèses astronomiques. Or, du point de vue de la méthode exposée dans l'*Apologia*, les observations sont le point de départ de la connaissance en astronomie ; en vertu de son réalisme, Kepler faisait face au même risque que les Épicuriens, soit celui d'affirmer en même temps la vérité de deux hypothèses contradictoires entre elles, mais concordantes avec les données (donc non infirmées). Nous avons vu que Kepler proposait alors deux solutions pour résoudre ce problème, dont la seconde ressemble à celle des Épicuriens : pour empêcher l'incohérence logique qui pourrait surgir en acceptant H_1 et H_2 , en apparence contradictoires entre elles, Kepler proposait de les regrouper sous une instance générale $H = \{H_1, H_2, H_3, \dots, H_n\}$, où H réfère à ce qu'il y a de commun entre H_1 et H_2 .

Lorsqu'est venu le temps d'appliquer, dans l'*Astronomia nova*, cette méthode *a posteriori*, fondée sur une forme de *ouk antimarturèsis*, Kepler a souvent eu recours à la vérification empirique d'une même hypothèse selon différents modèles (Ptolémée, Copernic, Tycho Brahe). Ainsi, l'hypothèse selon laquelle il faut adopter le Soleil vrai (au lieu du Soleil moyen) comme référence, celle supposant que le mouvement de la Terre est réellement de vitesse non uniforme, tout comme celle supposant un lien entre la vitesse d'une planète et sa distance au centre du monde, sont toutes trois vérifiées empiriquement selon différents modèles. S'ils ne sont pas infirmés par les données, Kepler ne conclura pas pour autant que ces modèles sont tous exacts ; mais la particularité propre à ces modèles, c'est-à-dire, ce qu'il y a de commun entre eux, sera alors considéré comme étant fort plausible. Kepler n'a pas le choix de procéder ainsi puisqu'une hypothèse n'est jamais testée de façon isolée ; c'est un ensemble de présupposés qui sont, chaque fois, non infirmés. Chercher ce qu'il y a de commun entre les ensembles de présupposés qui n'ont pas été infirmés semble être une bonne stratégie pour éventuellement construire le modèle – unique selon Kepler en vertu de son réalisme – qui correspond éventuellement à la réalité. C'est pour la même raison, semble-t-il, qu'il ne faut pas rejeter complètement un modèle ayant fait l'objet d'une infirmation (*antimarturèsis*) ; on le voit bien dans le cas du modèle correspondant à l'hypothèse alternative (< *hypothesis vicaria* >), que Kepler tente de sauver par différents moyens. Même

si elle doit être rejetée, puisque ses conséquences empiriques ne correspondent pas à ce qui est effectivement observé, elle est tout de même conservée comme outil de calcul, au même titre que le modèle de Tycho Brahe. Ces deux modèles ne peuvent évidemment pas correspondre à la réalité, non seulement parce qu'ils sont contradictoires entre eux, mais parce qu'ils sont infirmés par les données empiriques ; néanmoins, Kepler les utilise tous les deux pour calculer les longitudes de Mars. Nous pourrions dire alors que ces deux modèles peuvent se ranger sous une instance plus générale, qui correspond à ce qu'il y a de vrai et qui est confirmé dans ces deux modèles, bien que l'on ne puisse déterminer exactement ce à quoi cette instance plus générale réfère. L'acceptation provisoire d'explications multiples semble donc inévitable, chez Kepler, non pas parce qu'il adhère à un idéal d'ataraxie, mais parce qu'il est impossible de vérifier empiriquement une hypothèse isolée ; ce qui est un problème particulièrement présent en astronomie, dont l'objet est trop éloigné pour que l'on puisse procéder éventuellement à des expériences contrôlées en laboratoire.

En résumé, dans ce chapitre, nous avons vu trois méthodes (chez Platon, Aristote et Épicure) qui nous montrent que la connaissance des phénomènes célestes ou météorologiques, éloignés de la portée de nos sens mais tout de même accessibles, était conçue comme générant des hypothèses uniquement de l'ordre du vraisemblable, du possible ou de la vérité d'un ensemble plus général d'explications. La notion d'abduction, développée plus tard par Peirce et Hanson où elle est appliquée notamment aux recherches de Kepler pour rendre compte de la dialectique entre système explicatif (*explanans*) et observations (*explananda*), n'est donc pas une idée entièrement nouvelle. Néanmoins, la façon dont elle a été conceptualisée par ces deux logiciens était novatrice et a ensuite lancé un débat qui a amené plusieurs philosophes à proposer des variantes à leur modèle. Ce sont ces différentes approches que nous allons maintenant aborder dans le prochain chapitre, en voyant notamment comment elles ont été appliquées pour interpréter la démarche scientifique de Kepler.

Chapitre 6

Les interprétations abductives de la démarche de Kepler

L'importance des recherches de l'*Astronomia nova* pour le développement de la science ont fait de celles-ci un exemple fréquemment utilisé par ceux qui, depuis la révolution scientifique, se sont intéressés à la dialectique entre *explanans* et *explananda* ou, plus généralement, par ceux qui se sont penchés sur les raisonnements employés par les praticiens de la science. Comme le remarque par exemple Hanson : « Kepler typifies all reasoning in physical science. »⁵⁴⁴ Leurs discours n'ont toutefois pas toujours été appuyés par une étude complète de la démarche réelle de Kepler, comme on peut le remarquer par exemple chez le philosophe John Stuart Mill (1806-1873) dans son ouvrage *A System of Logic*, où il critique différents mauvais emplois du terme « induction » et se contente de remarquer que Kepler a découvert la trajectoire elliptique de Mars grâce aux données observationnelles. En analysant cet exemple, Mill soutient que la découverte de l'orbite elliptique de Mars par Kepler consistait uniquement en une description des faits, procédé de même nature (quoique plus difficile) que le procédé employé par un navigateur qui, découvrant peu à peu un morceau de terre dans l'océan, conçoit qu'il s'agit d'une île et non d'un continent⁵⁴⁵. Selon Mill, aucune inférence logique en tant que telle n'a été requise par Kepler ; pas même l'induction qui consistait seulement, dans ce cas, à supposer que la planète poursuivrait sa route en utilisant toujours la même forme de trajectoire, ce qui avait déjà été observé par les astronomes depuis les débuts de l'astronomie. Mill a utilisé cette brève analyse de la découverte de Kepler dans le cadre de son débat avec le philosophe William Whewell (1794-1866), qui voyait plutôt dans cette opération une « colligation » des faits, de type inductive, ajoutant quelque chose de plus aux observations⁵⁴⁶. Tout comme Hanson⁵⁴⁷, qui se montre très sévère envers l'analyse de Mill, je trouve que cette dernière est fort incomplète ; la première partie de cette thèse montre clairement que la démarche de Kepler ne peut pas se réduire au fait d'avoir simplement décrit

⁵⁴⁴ HANSON ([1958] 1965), p. 84.

⁵⁴⁵ MILL ([1858] 1958), III, 2, § 3.

⁵⁴⁶ MILL ([1858] 1958), III, 2, § 4. L'analyse de Whewell se retrouve notamment dans WHEWELL ([1857] 1967), vol. 1, V, 4.

⁵⁴⁷ HANSON ([1958] 1965), p. 84.

les observations, et que la vérification *a posteriori* n'est qu'une partie des raisons ayant justifié cette première loi de Kepler. En outre, cette « description des faits » est insuffisante pour interpréter la formulation et la justification de la seconde loi, qui n'est pas une simple description géométrique ; elle ne peut pas non plus nous aider à rendre compte du rôle de cette seconde loi dans la justification de la première loi. En ce sens, l'analyse de Whewell, qui s'appuie notamment sur l'histoire des idées scientifiques, a le mérite de tenir compte du rôle de l'appareil théorique et des raisons *a priori* dans ce processus, qui n'est pas compris comme une démarche purement empirique :

he [*sc.* Kepler] bound together particular observations of separate places of Mars by the notion, or, as I have called it, the *conception*, of an *ellipse*, which was supplied by his own mind. [...] Kepler, then, I say, bound together the facts by superinducing upon them the *conception* of an *ellipse* ; and this was an essential element in his Induction.⁵⁴⁸

Si l'adoption de l'ellipse pour décrire la trajectoire de Mars me semble effectivement relever notamment d'une opération *a priori* – rappelons-nous que Kepler lui-même résistait à l'ellipse même lorsqu'elle lui apparaissait décrire correctement les observations – je crois que Mill a toutefois raison d'affirmer qu'il ne s'agit pas d'une induction comme telle ; c'est bien la généralisation de cette forme de trajectoire à tous les moments (passés, présents et futurs), de même que la généralisation de cette trajectoire à toutes les planètes, qui sont des opérations proprement inductives. Quant à cette adoption de l'ellipse, suite à notre analyse de la démarche képlérienne, il faut assurément l'interpréter autrement que comme une simple description de faits ou une induction. L'inférence abductive est une excellente candidate pour interpréter ce processus de découverte, mais encore faut-il en préciser la nature et la façon dont elle peut s'appliquer aux recherches de Kepler.

L'abduction est une notion qui permet de conceptualiser l'opération qui consiste à générer logiquement une conclusion plausible, en permettant par exemple d'expliquer ce que nous observons. Elle a été mise sous une forme logique pour la première fois⁵⁴⁹ par C.S. Peirce, le père fondateur du pragmatisme, dans le cadre d'une théorie beaucoup plus générale développant également des aspects sémiologiques et épistémologiques. Notons qu'il n'est pas

⁵⁴⁸ WHEWELL (1849), pp. 28-29.

⁵⁴⁹ Selon ALISEDA (2006), p. 35. Nous avons toutefois vu, au chapitre 5, que cette idée n'était pas nouvelle.

toujours aisé de retracer exactement ce que Peirce entend par cette notion, d'autant plus qu'elle a évolué à plusieurs reprises en cours de route et qu'elle ne peut être complètement comprise que si elle est mise en lien avec les autres éléments de son système de pensée. Il est toutefois possible de relever, dans les écrits de Peirce, trois principales formulations de l'abduction, qui allaient ensuite donner le coup d'envoi au débat moderne sur cette notion. Nous débuterons ce chapitre en voyant (6.1) ces trois formulations chez Peirce et comment elles pouvaient s'appliquer, selon lui, aux recherches de Kepler. Nous poursuivrons ensuite avec (6.2) le modèle de Hanson, qui reprend en grandes parties les idées de Peirce comme grille d'analyse de son exposé sur les recherches de Kepler. Nous verrons ensuite deux variantes de ce modèle, qui me semblent particulièrement pertinentes pour cette thèse puisqu'elles ont été construites suite à des critiques du modèle de Hanson et de la justesse de son application aux recherches de Kepler. Nous verrons ainsi (6.3) les deux modèles d'abduction ajoutés par Kleiner, avant de nous pencher sur (6.4) le modèle d'abduction inverse de Myrstad. Tout au long de ce chapitre, ces différents modèles seront discutés et précisés en vue de proposer (6.5) ma propre interprétation de la démarche abductive chez Kepler.

6.1. Trois formulations de l'abduction selon Peirce

La première formulation de l'abduction chez Peirce a été évoquée au chapitre précédent⁵⁵⁰, où nous avons vu un passage affirmant que ce troisième type d'inférence, différent de la déduction et de l'induction, s'apparentait à l'*apagôgê* d'Aristote et devait être appelé « rétroduction ». Il s'agissait alors du processus consistant à adopter, de façon provisoire, une hypothèse en vertu du fait qu'elle n'avait pas été réfutée par ses conséquences observables. Ce procédé réductif, qui peut se comprendre comme étant l'équivalent de la méthode de non-infirmité (*ouk antimarturêsis*) des Épicuriens, peut être reconstruit logiquement sous cette forme (où H est l'hypothèse, P est une conséquence observable) :

1. $H \Rightarrow P$;
2. $\neg \neg P$;

⁵⁵⁰ À la section 5.2 de cette thèse.

3. Donc $\neg\neg H$.

C'est en proposant cette troisième inférence que Peirce en vient à citer l'exemple de Kepler pour l'illustrer : « Kepler shows his keen logical sense in detailing the whole process by which he finally arrived at the true orbit. This is the greatest piece of Retroductive reasoning ever performed. »⁵⁵¹ Cette analyse intervient notamment suite à une critique de celle de Mill : « Mill denies that there was any reasoning in Kepler's procedure. »⁵⁵² Selon Peirce, une certaine logique, de nature rétroductive, a guidé Kepler lorsqu'il a rejeté son premier modèle de Mars suite à une erreur observationnelle de huit minutes d'arc⁵⁵³, le modifiant ensuite minutieusement pour obtenir un modèle encore plus concordant avec les observations. Si ce procédé logique me semble effectivement bien décrire la démarche suivie par Kepler dans son évaluation empirique de ses différentes hypothèses, je suis moins d'accord avec Peirce lorsqu'il affirme que c'est ce même procédé logique qui a mené Kepler à comprimer l'orbite de Mars plutôt que de rejeter la loi des aires, qui ne semblait pas bien concorder avec les données⁵⁵⁴. Nous avons vu que le procédé, à cette étape, avait été beaucoup plus complexe qu'une simple vérification empirique.

Au moment où Peirce écrit ces lignes, il précise que ce raisonnement ne doit toutefois pas être appelé « abduction »⁵⁵⁵ pour autant. Effectivement, nous pouvons remarquer que ce processus ne consiste pas tant au fait de « se conduire en partant d'un point » (comme l'indiquerait l'étymologie, *ab-ducere*) mais bien à adopter, à rebours (*retro-ducere*), une hypothèse en vertu du fait que ses conséquences observationnelles n'ont pas été contredites par les observations effectuées. Nous pouvons quand même proposer que la rétroduction est une première formulation de l'abduction chez Peirce puisqu'il s'agit d'une inférence plausible à une hypothèse expliquant les phénomènes que nous observons, inférence que Peirce souhaite distinguer de l'induction quantitative et de la déduction.

Ce procédé réductif sera éventuellement ramené à l'induction dans un passage ultérieur : « **Induction** is the **experimental testing of a theory**. [...] The only thing that induction accomplishes is to determine the value of a quantity. It sets out with a theory and it

⁵⁵¹ PEIRCE (1931-1958), vol. 1, § 74.

⁵⁵² PEIRCE (1931-1958), vol. 1, § 71.

⁵⁵³ Nous avons vu cette étape chez Kepler à la section 4.1 de cette thèse.

⁵⁵⁴ PEIRCE (1931-1958), vol. 1, § 73.

⁵⁵⁵ Il faut donc être attentif lorsque HANSON ([1958] 1965), p. 85, affirme que Peirce traduit « *apagogé* » par « abduction » ou « rétroduction », car ce n'est pas le cas au moment où Peirce traite de la rétroduction.

measures the **degree of concordance of that theory with fact.** »⁵⁵⁶ Le raisonnement réductif n'est donc pas un bon candidat pour la troisième inférence recherchée puisque cette dernière doit rendre compte de la production même de la nouvelle hypothèse (contexte de découverte), et non simplement des raisons qui poussent à l'adopter provisoirement (contexte de justification). En d'autres mots, la rétroduction s'effectue après coup, une fois que l'hypothèse a été formulée ; et s'il est important de rendre compte du procédé logique impliqué dans la justification d'hypothèses explicatives préalablement « abduites », il ne faut pas en oublier la production même de ces hypothèses, si l'on ne veut pas simplement les attribuer à un heureux coup de chance et si l'on veut rendre compte logiquement, par exemple, de l'itinéraire rationnel de Kepler dans toute sa richesse et sa complexité.

Dans la deuxième formulation que je choisis de présenter ici, Peirce n'utilise plus le terme « rétroduction » mais il ne qualifie pas non plus d'abduction la troisième inférence recherchée. Dans ce passage, Peirce utilise plutôt le terme « hypothèse », car il s'agit non pas de la généralisation d'une hypothèse à tous les cas (pour en faire une loi), ce qui relève de l'induction, mais bien de la formulation même de cette hypothèse. Ainsi se présentent les trois inférences, que Peirce illustre par un exemple :

Deduction : Rule – All the beans from this bag are white

Case – These beans are from this bag

[Therefore] Result – These beans are white

Induction : Case – These beans are from this bag

Result – These beans are white

[Therefore] Rule – All the beans from this bag are white

Hypothesis : Rule – All the beans from this bag are white

Result – These beans are white

[Therefore] Case – These beans are from this bag⁵⁵⁷

Nous pouvons remarquer que ces trois raisonnements sont obtenus simplement en intervertissant les propositions tenant lieu de prémisses et de conclusion. Dans le cas de la

⁵⁵⁶ PEIRCE (1931-1958), vol. 5, § 145. Je souligne.

⁵⁵⁷ PEIRCE (1931-1958), vol. 2, § 623.

troisième inférence, on voit que cette formulation équivaut logiquement à un raisonnement réductif, que nous pourrions reconstruire ainsi :

1. Si une fève vient de ce sac, alors elle est blanche.
2. Ces fèves sont blanches.
3. Donc ces fèves viennent de ce sac.

La conclusion de cette inférence, qui est simplement plausible (puisque ces fèves pourraient très bien provenir d'un autre sac), permet de proposer une explication (« parce qu'elles viennent de ce sac, qui ne contient que des fèves blanches ») à un fait observable (« ces fèves sont blanches »). C'est exactement ce qui est recherché lors d'une abduction : proposer une hypothèse expliquant un phénomène. Cette formulation permet de bien voir que cette inférence diffère de l'induction, qui consisterait ici à généraliser à l'ensemble du contenu du sac ce qui a été observé pour une poignée de fèves.

Néanmoins, l'induction selon cette formulation pourrait aussi être rapportée à une forme de raisonnement réductif, que nous pourrions reconstruire ainsi :

1. S'il est vrai que toutes les fèves de ce sac sont blanches, alors nous observerons que les fèves qui viennent de ce sac sont blanches.
2. Ces fèves, qui viennent de ce sac, sont blanches.
3. Donc toutes les fèves de ce sac sont blanches.

On obtient à nouveau une conclusion plausible (car nous pourrions observer d'autres fèves, qui viennent de ce sac et qui ne soient pas blanches), à partir des conséquences observables. La différence entre l'induction et l'inférence à l'hypothèse n'est donc pas si nette ; il semble d'ailleurs qu'à cette époque, Peirce ne les distingue pas encore de façon absolue⁵⁵⁸. Peirce précise toutefois que la différence entre ces deux inférences réside dans la nature des faits impliqués dans le raisonnement : « The essence of an induction is that it infers from one set of facts to another set of similar facts, whereas hypothesis infers from facts of one kind to facts of another »⁵⁵⁹. Ainsi, dans les deux inférences, la première prémisse est une implication logique dont le conséquent, qui est observable, forme la deuxième prémisse ; mais alors que l'induction ne fait que généraliser une observation à l'ensemble des observations du même type, l'hypothèse se prononce sur des observations de nature différente et nous apprend donc

⁵⁵⁸ Comme le remarque notamment FANN (1970), p. 22.

⁵⁵⁹ PEIRCE (1931-1958), vol. 2, § 642.

quelque chose de réellement nouveau. Dans le cas de Kepler, l'induction permettrait alors de conclure, par exemple, que toutes les planètes suivent une trajectoire pouvant être reconstruite selon une forme elliptique⁵⁶⁰. Toujours en suivant cette deuxième tripartition des inférences selon Peirce, nous pourrions obtenir ceci pour l'induction :

1. La Terre et Mars sont des planètes.
2. La Terre et Mars suivent une trajectoire pouvant être reconstruite par une forme elliptique.
3. [Donc] toutes les planètes suivent une trajectoire pouvant être reconstruite par une forme elliptique.

Sous sa forme rétroductive, cette induction se formulerait ainsi :

1. S'il est vrai que toutes les planètes suivent une trajectoire pouvant être reconstruite par une forme elliptique, alors nous observerons que les planètes ont des positions de type P_1, P_2, P_3, \dots
2. Il a été observé que ces planètes (la Terre et Mars) ont des positions de type P_1, P_2, P_3, \dots
3. Donc toutes les planètes suivent une trajectoire pouvant être reconstruite par une forme elliptique.

Quant à l'inférence à l'hypothèse, elle doit permettre d'apprendre quelque chose de nouveau, de nature explicative, par rapport aux phénomènes. Si nous voulons appliquer correctement la formulation de Peirce aux recherches de Kepler, nous ne pouvons pas simplement intervertir les propositions de l'induction précédente puisque nous obtiendrions « La Terre et Mars sont des planètes » comme conclusion, ce qui n'est pas pertinent pour les recherches de Kepler. Une formulation appropriée⁵⁶¹, permettant d'obtenir comme conclusion la première loi, pourrait être celle-ci :

a) Inférence à l'hypothèse appliquée à Kepler #1 :

1. Toutes les planètes qui suivent une trajectoire elliptique ont des positions

⁵⁶⁰ Pour cette induction, j'évite le raccourci « les planètes suivent une trajectoire elliptique » puisque, contrairement à la blancheur des fèves, la forme elliptique des trajectoires planétaires n'est pas une donnée sensorielle directe. Il faut la reconstruire (et non simplement décrire les faits comme l'affirmerait Mill).

⁵⁶¹ Cette formulation est appropriée pour rendre compte des recherches de Kepler, mais sa transformation en induction, selon cette tripartition de Peirce proposant de procéder en intervertissant les propositions, n'est pas intéressante puisqu'elle nous fait obtenir « Toutes les planètes qui suivent une trajectoire elliptique ont des positions observables de type P_1, P_2, P_3, \dots » comme conclusion, ce qui n'est pas proprement inductif.

observables de type P_1, P_2, P_3, \dots

2. Ces planètes (Mars et Terre) ont des positions observables de type P_1, P_2, P_3, \dots
3. Donc ces planètes (Mars et Terre) suivent une trajectoire elliptique.

Tout comme dans le cas de l'induction, cette inférence à l'hypothèse peut être reformulée sous une forme rétroductive, qui va comme suit :

1. Si ces planètes (Mars et Terre) suivent une trajectoire elliptique, alors nous pourrions observer, pour ces planètes, des positions de type P_1, P_2, P_3, \dots
2. Nous avons observé que ces planètes (Mars et Terre) avaient des positions de type P_1, P_2, P_3, \dots
3. Donc ces planètes (Mars et Terre) suivent une trajectoire elliptique.

Cette formulation permet de rendre compte de la vérification *a posteriori* de l'hypothèse de la trajectoire elliptique et d'obtenir une conclusion se prononçant sur des faits de nature différente, pour reprendre la formulation de Peirce, donc qui ne soit pas simplement inductive. Néanmoins, comme cette inférence vise à obtenir une hypothèse explicative, il me semble que de conclure simplement à la trajectoire elliptique ne remplit pas suffisamment ce rôle. Effectivement, la forme de la trajectoire relève davantage d'une description (relevant du « comment ») que d'une explication (relevant du « pourquoi »). Certes, cette description des mouvements célestes nécessite un travail de reconstruction des observations et n'est pas inférée directement à partir des phénomènes, sans quoi nous risquons de retomber dans une explication trop simpliste, comme celle de Mill ; mais elle n'en demeure pas moins une description et non une explication à proprement parler. Or on se souvient que, pour Kepler, l'astronomie doit non seulement reconstruire les mouvements selon une description géométrique, mais fournir une explication à cette reconstruction, explication qui relève de la physique. En ce sens, il me semble plus pertinent d'appliquer ce modèle d'inférence à l'hypothèse en obtenant comme explication, et donc comme conclusion de cette inférence, la seconde loi de Kepler, qui propose une explication de nature dynamique. Dans ce cas, je me permets de prendre « ces planètes (Terre et Mars) suivent une trajectoire elliptique », conclusion du raisonnement ci-haut, comme étant la seconde prémisse (soit le « result » de Peirce) d'une seconde inférence à l'hypothèse, même s'il s'agit d'une reconstruction géométrique à partir des données observationnelles, et non d'un fait directement observable

(de type « ces fèves sont blanches »). Cela me semble légitime ici pour rendre compte des motivations de Kepler et de la différence de nature entre les deux premières lois : la première loi est une description géométrique (obtenue par reconstruction, et non par observation directe ou simple description des faits, et adoptée en vertu d'une première inférence à l'hypothèse), la seconde loi est une explication physique. Nous obtenons alors ceci comme seconde inférence à l'hypothèse :

b) Inférence à l'hypothèse appliquée à Kepler #2 :

1. Toutes les planètes qui respectent la loi des aires doivent suivre une trajectoire elliptique.
2. Ces planètes (Terre et Mars) suivent une trajectoire elliptique.
3. [Donc] ces planètes respectent la loi des aires.

Pour bien rendre compte de cette seconde inférence à l'hypothèse, il faut sous-entendre, pour la conclusion, qu'il s'agit de l'explication des phénomènes énoncés à la prémisse 2. Nous pourrions la reformuler en ajoutant cette précision :

3. [Donc] ces planètes respectent la loi des aires, et c'est pour cette raison qu'elles ont cette trajectoire elliptique.

Tout comme dans le cas de l'induction, cette inférence peut être reformulée sous une forme rétroductive, qui se formulerait comme suit :

1. Si ces planètes respectent la loi des aires, alors elles doivent suivre une trajectoire elliptique.
2. Ces planètes suivent une trajectoire elliptique.
3. Donc ces planètes respectent la loi des aires.

L'avantage de cette seconde inférence à l'hypothèse, celle de « b » ci-dessus, est que nous pouvons bien voir la relation entre la première et la seconde loi de Kepler : cela nous permet de comprendre pourquoi il était si important que Kepler envisage la première prémisse (soit le lien entre la reconstruction géométrique et les considérations dynamiques) pour que se trouve pleinement entériné son système, dont la description géométrique vient confirmer *a posteriori* la loi des aires, fondée *a priori*. Inversement, cette description géométrique, qui admet d'autres descriptions concurrentes – on pourrait imaginer, dans le raisonnement « a » précédent, qu'une autre forme de trajectoire puisse engendrer P_1, P_2, P_3 – se voit confirmée davantage puisqu'elle découle logiquement d'une loi fondée *a priori*. Il ne faut donc pas

s'arrêter à cette première inférence à l'hypothèse « a » : les deux inférences à l'hypothèse « a » et « b » font assurément toutes deux partie intégrante du raisonnement de Kepler. Un autre avantage de la formulation en « b » est qu'elle vise bien une explication des phénomènes et non simplement leur reconstruction, ce qui respecte les intentions de Peirce. Comme le remarque Atocha Aliseda : « For Peirce, three aspects determine whether a hypothesis is promising : it must be *explanatory*, *testable*, and *economic*. »⁵⁶² Alors que le caractère testable était le seul mis en valeur dans la première formulation (réduction) de Peirce que j'ai présentée, c'est maintenant le caractère explicatif qui est mis de l'avant dans cette deuxième formulation (inférence à l'hypothèse). Ce caractère explicatif se retrouve mieux exprimé en « b » plutôt qu'en « a » en ce que la loi des aires permet réellement d'expliquer la trajectoire elliptique, tandis que la trajectoire elliptique permet de décrire les observations que nous obtenons. Évidemment, description géométrique et explications physiques sont toutes deux essentielles pour Kepler, en vertu de sa conception des objectifs et de la méthode de l'astronomie nouvelle.

La troisième formulation de Peirce que je retiens pour notre discussion est celle qui est habituellement retenue par ceux qui le citent. Le terme « abduction » est alors utilisé et il est défini ainsi :

Abduction is the process of forming an **explanatory hypothesis**. It is the only logical operation **which introduces any new idea**; for induction does nothing but determine a value, and deduction merely evolves the necessary consequences of a pure hypothesis. Deduction proves that something must be; Induction shows that something actually is operative; Abduction merely **suggests that something may be**.⁵⁶³

Pour exprimer la forme logique de cette inférence plausible à une hypothèse explicative, inférence qui apporte de la nouveauté, Peirce propose la formulation suivante :

The surprising fact, C, is observed ;
 But if A were true, C would be a matter of course ;
 Hence, there is reason to suspect that A is true.⁵⁶⁴

⁵⁶² ALISEDA (2006), p. 36.

⁵⁶³ PEIRCE (1931-1958), vol. 5, § 171. Je souligne.

⁵⁶⁴ PEIRCE (1931-1958), vol. 5, § 189.

Cette formulation, contrairement aux deux premières, place l'observation des phénomènes comme première prémisse : elle est ici réellement le point de départ de l'inférence. Comme le remarque Aliseda⁵⁶⁵, c'est cette formulation peircienne qui a été reprise en général par ceux qui travaillent en intelligence artificielle sur cette notion d'abduction, qui l'ont interprétée ainsi :

C

A ⇒ C

A (dont le statut est provisoire)

Cette formulation ne rend pas complètement compte de la conception de Peirce⁵⁶⁶, qui va au-delà d'une simple confirmation provisoire d'une hypothèse. Par exemple, la formulation de Peirce indique qu'il convient de partir non pas de tous les faits, mais d'un fait « surprenant » ; or si un fait nous apparaît surprenant, ce ne peut être que par rapport à une conception préétablie, un système préexistant dont « ¬ C » est une conclusion, ce qui n'a pas été pris en compte par cette reconstruction logique. Autre insuffisance : dans cette reconstruction logique, on ne précise pas que « A » doit expliquer « C ». Or il est important d'apporter cette précision, sans quoi on risque d'obtenir une inférence de type inductive, soit l'inférence à une règle « A » à partir d'une confirmation empirique « C », où « A » n'apporte rien de particulièrement nouveau ni explicatif quant à « C ». Autrement dit, la nature du lien « A ⇒ C » est primordiale si nous souhaitons générer des hypothèses explicatives en sciences. Il s'agit là d'un critère essentiel pour Peirce⁵⁶⁷, dont le pragmatisme diffère du positivisme logique même si, pour ces deux écoles, toute hypothèse doit être testable empiriquement. Ce critère sera toutefois moins important pour Hanson, lorsqu'il reprendra cette troisième formulation de Peirce.

6.2. Le modèle de Hanson

L'analyse de Hanson s'appuie sur une bonne connaissance de l'*Astronomia nova*, dont il traite dans le quatrième chapitre de son ouvrage *Patterns of Discovery*. Il le fait dans l'intention de réfuter deux modèles traditionnels permettant de rendre compte de la rationalité

⁵⁶⁵ Cf. ALISEDA (2006), pp. 36-37.

⁵⁶⁶ C'est également l'opinion d'Aliseda.

⁵⁶⁷ Comme le remarque FANN (1970), p. 45 : « The function of science, Peirce maintains, is essentially *explanatory*. »

de la découverte scientifique, soit celui fondé sur l'induction, et celui fondé sur une approche hypothético-déductive. Selon Hanson, ces deux modèles sont compatibles malgré les apparences : les physiciens pourraient procéder par tâtonnement empirique pour trouver une loi, puis en déduire les conséquences empiriques avant de vérifier si elles sont réalisées. Or selon Hanson ces deux approches sont à rejeter : la première ne correspond pas à ce qui est effectivement pratiqué par les physiciens, tandis que la seconde a le défaut d'avoir pour point de départ les hypothèses, et non les observations (défaut que n'a toutefois pas la première approche). Comme l'affirme Hanson : « Physicists do not start from hypotheses ; they start from data »⁵⁶⁸. L'objectif de Hanson est donc de proposer un modèle ayant comme point de départ les observations et interprétant le lien entre ces observations et les lois qui en sont extraites de façon autre que par une inférence inductive. C'est à ce moment que l'abduction de Peirce est proposée comme rendant bien compte de ce lien, tandis que l'exemple de la découverte de l'ellipse par Kepler est d'abord décrit en détail, puis analysé pour illustrer ce modèle.

Hanson reprend à peu de mots près le modèle de Peirce selon la troisième formulation ci-haut, qui place l'observation à l'intérieur de la première prémisse :

c) Modèle de Hanson :

1. Some surprising phenomenon P is observed.
2. P would be explicable as a matter of course if H were true.
3. Hence there is reason to think that H is true⁵⁶⁹.

Nous pouvons remarquer que la formulation de Hanson introduit le terme « explicable » dans la deuxième prémisse, assurément pour rendre compte de ce critère explicatif important pour Peirce. Selon Hanson, pour remplir ce critère, il s'agit de percevoir les patrons (< *patterns* >), c'est-à-dire les structures ou formes récurrentes dans les phénomènes : « Perceiving the pattern in phenomena is central to their being 'explicable as a matter of course'. »⁵⁷⁰ Cette définition de l'explication comme perception d'une structure au sein des phénomènes n'est pas sans nous rappeler l'exigence képlérienne de découvrir les archétypes mathématiques qui régissent la nature. Néanmoins, affirmer que le processus même de découverte képlérien peut

⁵⁶⁸ HANSON ([1958] 1965), p. 70.

⁵⁶⁹ HANSON ([1958] 1965), p. 86.

⁵⁷⁰ HANSON ([1958] 1965), p. 87.

se comprendre uniquement comme un processus « from *explicanda* to *explicans* »⁵⁷¹ ne rend pas bien compte de l'inférence logique qui a été effectivement à l'œuvre dans l'*Astronomia nova*. Hanson lui-même, lorsqu'il décrit les différentes étapes ayant mené à la découverte de la forme elliptique des trajectoires planétaires, met en valeur le changement conceptuel énorme que cela représentait par rapport au paradigme circulaire de l'époque. On se souvient que, dans un article cité précédemment⁵⁷² où il traite à nouveau de cette découverte, Hanson en appelait même à une « révolution képlérienne »⁵⁷³ pour décrire ce pas immense dans l'histoire de l'astronomie, mettant en valeur le caractère révolutionnaire de cet abandon du principe circulaire, datant des débuts de l'astronomie. Ce faisant, la description de Hanson ne peut pas se réduire au simple fait d'avoir « vu » l'ellipse dans les phénomènes ; ou encore, le fait de « voir » l'ellipse ne peut s'expliquer sans montrer que Kepler conçoit une nouvelle astronomie lui permettant éventuellement de « voir » (*i.e.* découvrir et justifier)⁵⁷⁴ que les mouvements célestes ne sont pas circulaires. La description de Hanson me semble donc plus juste que son analyse logique, la seconde ne correspondant pas complètement à la première. C'est également l'opinion du philosophe Andrew Lugg :

The Keplerian revolution in astronomy, as Hanson describes it, cannot be reduced to the discovery of a hypothesis that explains Tycho's data as a matter of course ; it should rather be seen as having involved the **radical revision of a powerful and well-established theoretical framework**.⁵⁷⁵

Cette révision d'un appareil théorique nécessitait, pour Kepler, la production d'un nouveau système explicatif dont la trajectoire elliptique devait découler. D'ailleurs nous pouvons bien voir, dans la formulation de l'abduction selon Hanson, que l'inférence débute en observant un phénomène *P* qui soit surprenant. Or comme nous l'avons noté précédemment, pour que *P* soit surprenant aux yeux d'un scientifique, il faut que « $\neg P$ » découle logiquement de la structure (appelons-la « *H'* ») attendue par ce scientifique. Si le scientifique dispose d'une théorie bien

⁵⁷¹ HANSON ([1958] 1965), p.84. Hanson utilise ici des formes du verbe latin « *explico* », mais l'usage aujourd'hui est d'employer des formes du verbe « *explano* », d'où *explanans* et *explananda*.

⁵⁷² À la section 4.4 de cette thèse.

⁵⁷³ Cf. HANSON (1961).

⁵⁷⁴ Comme le remarque avec justesse Lugg: « In this case [*sc.* la découverte de la forme elliptique de Mars], justification and discovery coincided. » LUGG (1985), p. 216. Nous avons vu, dans l'introduction du chapitre 5 de cette thèse, que la distinction entre contexte de découverte et contexte de justification était atténuée dans le cas de l'abduction et, plus généralement, de la logique de la découverte.

⁵⁷⁵ LUGG (1985), p. 210. Je souligne.

établie, H' fait elle-même partie d'un système explicatif (chez Kepler, ce système explicatif en astronomie trouve ses fondements dans la physique) ; par conséquent, inférer un nouveau H nécessite non seulement d'abandonner une structure H' et de la remplacer par une nouvelle structure H , mais de trouver un nouveau système explicatif dont H découle logiquement. Il y aurait donc une autre abduction effectuée ici, qui aurait comme point de départ une structure des phénomènes (et non un phénomène) et qui se présenterait comme suit, sous la forme de Hanson (où S fait référence au système explicatif tel que, par exemple, les considérations dynamiques de Kepler) :

d) Modèle de Hanson appliqué différemment :

1. Some surprising pattern H is "observed"⁵⁷⁶
2. H would be explicable as a matter of course if S were true.
3. Hence there is reason to think that S is true⁵⁷⁷.

Ainsi, H , préalablement justifié empiriquement dans le raisonnement abductif « c », servirait dans « d » à justifier S , tout en trouvant lui-même une sorte de justification supplémentaire dans le fait qu'il s'inscrit à l'intérieur d'un nouveau système explicatif (ce qui n'est toutefois pas indiqué dans ce processus logique). L'abduction se déroulerait donc en deux temps, et l'importance de développer le lien « $S \Rightarrow H$ » présent dans la seconde prémisse du raisonnement abductif ci-haut « d » permet de mettre en valeur le rôle des spéculations théoriques pour la pleine justification de H et de S . Pour que soit complète cette reconstruction logique dans le cas des recherches de Kepler, il faudrait spécifier que le système S est également fondé sur des raisons *a priori*, et que ces raisons permettent également de justifier *a priori* la structure H ; ce qui ne signifie pas que S ne puisse pas être éventuellement rejeté sur des bases empiriques.

Tout ce travail de reconstruction d'un système explicatif décrit en « d » semble absent de l'analyse de Hanson, qui s'en tient au simple remplacement de H et ignore cette seconde abduction. Cela dit, bien que l'analyse de Hanson me semble incomplète puisqu'elle ne décrit que ce qui m'apparaît être une première étape abductive, cette première étape « c » y est décrite de façon juste : percevoir la structure elliptique parmi les observations correspondait

⁵⁷⁶ J'insère des guillemets ici puisque, à proprement parler, un patron (< *pattern* >) n'est pas directement observé (contrairement aux phénomènes). Cela dit, pour Hanson, saisir la structure dans les phénomènes s'apparente au processus d'interprétation inhérent à la perception sensorielle.

⁵⁷⁷ HANSON ([1958] 1965), p. 86.

d'ailleurs à notre première inférence à l'hypothèse appliquée à Kepler (en « a ») chez Peirce et rend bien compte de l'opération qui consiste à inférer une description des phénomènes.

Il n'en demeure pas moins que toute reconstruction logique de la démarche képlérienne exprimée dans l'*Astronomia nova* doit, pour être complète, rendre compte du rôle de l'appareil théorique dans la découverte de l'ellipse. Si l'abduction telle qu'envisagée par Hanson ne nous semble pas complète pour décrire cette démarche, cela ne signifie pas que nous devons abandonner cette notion pour autant puisque nous pouvons adapter ce modèle, en y ajoutant une autre application comme celle de « d », afin qu'il puisse mieux rendre compte des recherches de Kepler. Une autre stratégie est de proposer une modification de ce modèle. C'est ce que propose le philosophe Scott A. Kleiner, dont la critique de Hanson mène à sa proposition de deux nouvelles formes d'abduction permettant de rendre compte logiquement du processus de recherche effectué dans l'*Astronomia nova*.

6.3. L'abduction inverse et l'abduction comparative de Kleiner

Dans son article intitulé "A New Look at Kepler and Abductive Argument", Kleiner se penche sur les interprétations abductives de la démarche képlérienne par Peirce et Hanson, qu'il juge toutes deux insuffisantes puisqu'elles ne tiennent pas compte de l'objectif ayant guidé Kepler tout au long de ses recherches : « both Hanson and Peirce overlook the fundamental goal of Kepler's search, as manifested in his early writings and throughout the report of his activities in the *Astronomia nova* »⁵⁷⁸. Pour pallier cette insuffisance, l'interprétation de Kleiner laisse une grande place aux principes développés dans le *Mysterium cosmographicum*, auxquels il fait référence en parlant d'un « patron métaphysique » <*metaphysical blueprint*>, reprenant ici la terminologie proposée par Nicholas Maxwell⁵⁷⁹. Selon Kleiner, tenir compte des objectifs réels de Kepler nous amène à réviser l'idée selon laquelle les observations forment le point de départ de la démarche képlérienne :

Contrary to Hanson's suggestion, **Tycho's observations are neither the 'starting point' for Kepler's investigations**, nor do they 'set the problem' for Kepler. Rather, Kepler's problem was set initially when he embraced a **metaphysical blueprint** in

⁵⁷⁸ KLEINER (1983), p. 280.

⁵⁷⁹ Cf. MAXWELL (1974).

which traditional astronomy appears to be insufficient in the explanations it offers or suggests.⁵⁸⁰

À la lumière de ce qui a été présenté dans la première partie de cette thèse, je suis tout à fait d'accord avec cette idée selon laquelle les présupposés évoqués dans le *Mysterium cosmographicum*⁵⁸¹ ont joué un rôle crucial dans l'élaboration de la nouvelle astronomie et que, dans cette optique, la démarche képlérienne ne peut pas se réduire à un processus prenant les observations comme unique point de départ. Quant aux origines et aux justifications de ce système métaphysique, Kleiner croit qu'il est peut-être impossible de les retracer de façon méthodologique, rationnelle ou philosophique : « We may have no methodological account of Kepler's initial act of embracing this metaphysic, although socio-psychological or anthropological accounts might be given of the influences of tradition, mentors, and so on »⁵⁸². Sur ce dernier point, je ne suis toutefois pas d'accord ; nous avons vu, dans la première partie de cette thèse⁵⁸³, que l'adoption même de ces présupposés métaphysiques était loin d'être arbitraire ou irrationnelle. Cela dit, Kleiner croit avec raison que le rôle logique de cette structure métaphysique, malgré ses origines en apparence nébuleuses, ne doit pas être négligé pour autant si l'on souhaite interpréter correctement la démarche képlérienne, ce qui se traduit dans le modèle abductif qu'il propose.

Pour ce faire, Kleiner propose d'ajouter deux autres étapes abductives pour rendre pleinement compte de la démarche képlérienne⁵⁸⁴. À noter que Kleiner conserve malgré tout le modèle abductif de Hanson – celui décrit en « c » ci-haut – qui lui semble toutefois incomplet en ce qu'il présuppose un travail préalable quant au caractère explicatif de *H* : « although Hanson may not be fully aware of it, he advocates a research programme in which some kind of assessment of the explanatory power of *H* must occur before *H* is abductively warranted »⁵⁸⁵. C'est pour illustrer ce travail préalable que Kleiner propose, pour la découverte de la première loi de Kepler (forme elliptique des trajectoires), l'abduction suivante, qu'il

⁵⁸⁰ KLEINER (1983), p. 296. Je souligne.

⁵⁸¹ Ces présupposés ont été mis en lumière dans le chapitre 1 de cette thèse.

⁵⁸² KLEINER (1983), p. 296.

⁵⁸³ Notamment aux chapitres 1 et 3.

⁵⁸⁴ Précisons que Kleiner énonce en conclusion de son article ces deux autres modèles et qu'il ne les développe pas davantage.

⁵⁸⁵ KLEINER (1983), p. 287. À noter que, comme le remarque Kleiner, Hanson propose plusieurs critères pour l'adoption d'un *H* acceptable en tant que « pattern », sans que cela ne change quoi que ce soit quant à sa définition de l'abduction comme inférence d'une structure à partir des phénomènes.

nomme abduction inverse (où, tel que précisé par Kleiner, P représente la forme elliptique des planètes, H le programme de recherche de Kepler) :

e) Abduction inverse de Kleiner :

Premise : if P were true, then P would be explained as a matter of course by preferred hypothesis H

Conclusion : there is reason to believe P true⁵⁸⁶.

Kleiner nomme ce raisonnement un argument abductif inverse (<converse abductive argument>), sans toutefois préciser davantage ce qu'il entend par là outre le fait que cela est « évident » si on le compare à l'argument abductif standard (équivalent à ce qui est reproduit en « c » plus haut). Quant aux raisons permettant d'autoriser cette abduction, Kleiner en suggère deux : cet argument est répandu dans des programmes de recherche fructueux, et il semble conforme avec des intuitions méthodologiques présystématiques⁵⁸⁷.

Cette abduction inverse ressemble beaucoup à ce qui a été présenté en « d » précédemment (où H et S dans « d » correspondent respectivement à P et H dans « e » ; cette correspondance se justifie en vertu de la signification de P et H précisée par Kleiner dans « e »). Ainsi, dans « d », ce qui tient lieu de prémisse #2 devient le conséquent de la relation d'implication logique exprimée dans la prémisse du raisonnement présenté en « e ». Kleiner a raison de mettre, à l'intérieur de cette prémisse, le lien crucial « P would be explained as a matter of course by preferred hypothesis H », soit le lien entre la description géométrique proposée et le système explicatif dans lequel elle s'inscrit ; néanmoins je crois qu'il aurait dû également l'isoler dans une prémisse indépendante (ce qui est implicite dans son raisonnement), tel que proposé dans la prémisse #2 de « d ». Nous aurions alors bien vu en quoi ce raisonnement est une abduction : il permet d'inférer l'antécédent de l'implication logique en vertu de la présence de son conséquent. Contrairement à la formulation en « d », qui correspond à ce que nous pourrions appeler une forme standard de l'abduction, l'inférence en « e » est construite de façon à inférer, à partir du lien « P would be explained as a matter of course by preferred hypothesis H », non pas H mais P . C'est en ce sens que l'abduction est l'inverse de celle proposée par Hanson.

⁵⁸⁶ KLEINER (1983), p. 311.

⁵⁸⁷ KLEINER (1983), p. 311.

Pour bien comparer ces deux types d'abduction, soit celle proposée en « d » (abduction standard) et celle proposée en « e » (abduction inverse), incluant toutes deux le lien d'explication entre la description géométrique (forme elliptique) des planètes et le système explicatif (ou programme de recherche) à l'intérieur duquel elle s'inscrit, nous pouvons les reconstruire logiquement⁵⁸⁸ de la façon suivante, en uniformisant les symboles utilisés (H renvoie à la description elliptique des planètes, S au système explicatif ou programme de recherche ; la relation logique d'implication « \Rightarrow » est utilisée sous certaines conditions, à savoir, que le conséquent est expliqué comme allant de soi si l'antécédent est adopté) :

f) Modèle de Hanson appliqué différemment (« d »), reconstruit logiquement :

1. H
2. $S \Rightarrow H$
3. Donc S .

g) Abduction inverse de Kleiner (« e »), effectuée à partir du lien entre le système S et sa description géométrique H , reconstruite logiquement et ajoutant la prémisse #1 qui y était implicite :

1. $S \Rightarrow H$
2. $H \Rightarrow (S \Rightarrow H)$
3. Donc H .

Dans les deux cas, nous présupposons que l'abduction standard selon Hanson a également été effectuée, laquelle peut être reconstruite comme suit (où H renvoie à la description elliptique des planètes, P aux phénomènes):

h) Modèle de Hanson (« c »), reconstruit logiquement :

1. P
2. $H \Rightarrow P$
3. Donc H .

⁵⁸⁸ Lors de ces reconstructions logiques, il faut se montrer prudent et veiller à toujours préciser la nature de ce qui peut faire office de S , H , P et « \Rightarrow », sans quoi l'on risque de commettre l'erreur d'obtenir une inférence ne se distinguant pas de l'induction, tel que vu dans la section 6.1 de cette thèse.

L'avantage du modèle d'abduction inverse de Kleiner en « g » est de bien montrer en quoi H , justifié empiriquement lors de l'abduction formulée en « h », trouve une justification supplémentaire dans le fait qu'il est appuyé par un système explicatif S . Conformément aux souhaits de Kleiner, cette abduction rend bien compte des objectifs de Kepler, que nous avons mis en valeur notamment dans le chapitre 4 de cette thèse : l'importance de fonder l'astronomie nouvelle sur des causes, et non seulement de produire des hypothèses permettant de reconstruire géométriquement les phénomènes (tel qu'indiqué en « h »). Tandis que le raisonnement en « f » ne fait que refléter la justification ultimement empirique de S (si l'on tient pour acquis que H a été préalablement abduit des phénomènes), le raisonnement en « g » rend bien compte du rôle heuristique et justificateur de S dans la production et la justification de H . Ainsi, dans une telle abduction inverse, se trouve illustré le fait que, par exemple, la loi des aires fut élaborée et adoptée avant l'adoption de l'ellipse – qui, on s'en souvient, avait été rejetée à plusieurs reprises, tant et aussi longtemps que le lien « considérations dynamiques \Rightarrow ellipse » ne fût pas envisagé par Kepler.

Un autre avantage de cette abduction inverse est qu'elle marque bien la distinction entre le modèle abductif et le modèle hypothético-déductif, ce qui était le souhait de Hanson. Selon le modèle hypothético-déductif, il serait possible d'inférer temporairement « H » à partir de son lien avec le système, de la façon suivante :

i) Modèle hypothético-déductif, première étape (où S est un système explicatif, conjectural):

1. $S \Rightarrow H$
2. S
3. Donc H .

Puisque dans ce raisonnement « i », S n'aurait qu'un statut conjectural, il s'agirait ensuite de vérifier que les phénomènes impliqués par l'adoption de H (en vertu de « $H \Rightarrow P$ ») sont observés dans la nature. Si l'on compare les raisonnements « g » et « i », seule la prémisse #2 est différente ; mais le raisonnement de Kleiner (« g ») a l'avantage de montrer que c'est en vertu de son lien avec le système S que H est possible (et non certain), alors que dans « i », si H n'est que possible, c'est parce que l'antécédent logique S n'est qu'une conjecture attendant

une vérification expérimentale. L'abduction inverse de Kleiner permet de montrer en quoi le système *S* joue un rôle à la fois heuristique et justificateur dans le processus de découverte.

La deuxième étape abductive proposée par Kleiner pour compléter la reconstruction logique du processus de découverte consiste simplement à modifier l'abduction standard en ajoutant une précision, qui tient compte cette fois-ci de la possibilité qu'il y ait plusieurs hypothèses *H* pouvant expliquer un phénomène *P* ; devant la multiplicité des explications possibles pour un même phénomène, il s'agit de choisir celle qui semble être la « meilleure ». Cette deuxième abduction est appelée abduction comparative (<*comparative abduction argument*>) et se formule comme suit :

j) Abduction comparative de Kleiner :

Premise 1 : phenomenon *P* is observed and is surprising

Premise 2: hypothesis *H* provides a better explanation of *P* than alternative *H'*,...

Conclusion : there is reason to prefer *H* to *H'*, ...⁵⁸⁹

Comme le remarque avec justesse Kleiner, cette abduction ne diffère pas beaucoup du modèle standard : « It should be evident that the comparative form is merely a generalization of the form originally offered by Hanson and Peirce »⁵⁹⁰. Il s'agit simplement ici de rappeler que lorsque *H* est abduit des phénomènes (selon l'abduction standard « c » ou « h »), il se produit un processus de choix parmi les multiples hypothèses possiblement concordantes avec les phénomènes. Cela n'est pas sans nous rappeler l'inférence à la meilleure explication (<*inference to the best explanation*>) formulée par Gilbert Harman⁵⁹¹ pour rendre compte de l'abduction. De fait, à moins d'employer la méthode des explications multiples des Épicuriens⁵⁹², qui conserveraient *H*, *H'*, ... comme explications également vraies, l'inférence plausible à une (et une seule) hypothèse explicative exige de choisir parmi plusieurs candidates possibles. Néanmoins, comme le suggère Gerhard Minnameier⁵⁹³, l'abduction et l'inférence à la meilleure explication ne font pas référence exactement au même processus, du

⁵⁸⁹ KLEINER (1983), p. 311.

⁵⁹⁰ KLEINER (1983), p. 311.

⁵⁹¹ Cf. HARMAN (1965).

⁵⁹² Développée à la section 5.3 de cette thèse.

⁵⁹³ Cf. MINNAMEIER (2004).

moins chez Peirce. La différence peut se formuler ainsi : « while abduction marks the process of generating theories – or, more generally, concepts – IBE⁵⁹⁴ concerns their evaluation »⁵⁹⁵. On se souvient que Peirce recherchait une inférence permettant logiquement de produire une nouvelle hypothèse qui pourrait ensuite être justifiée, inductivement par exemple, en vertu de sa concordance avec les phénomènes. Néanmoins, rappelons-nous que la différence entre le contexte de découverte et le contexte de justification se voit atténuée dans le cas des recherches képlériennes⁵⁹⁶ : ainsi, la « découverte » de l'ellipse ne fut réellement envisagée, et testée, que lorsqu'elle fut mise en lien avec l'ensemble du système. Cela n'est pas surprenant dans la mesure où, pour qu'une hypothèse puisse être jugée digne d'être testée, encore faut-il qu'elle soit justifiée partiellement ou « retenue » comme candidate potentielle.

Ce type de justification est toutefois bien différent de la simple vérification empirique, qui n'est pas encore effectuée à ce stade. On pourrait donc aisément concevoir, comme le fait Kleiner, que le processus abductif se décline sous trois formes ou étapes : la première forme, abduction standard, inférant provisoirement une description ou structure H à partir des phénomènes (dont un de ces phénomènes est surprenant par rapport à l'ancienne hypothèse, mais normal ou allant de soi lorsqu'envisagé à partir du nouveau H) ; une seconde forme, abduction inverse, adoptant provisoirement H en vertu du fait qu'elle découle d'une structure métaphysique préalable, ou programme de recherche ; et une troisième forme, abduction comparative, choisissant H parmi les autres hypothèses possiblement abductibles selon la première forme (H, H', \dots)⁵⁹⁷.

Nous pouvons remarquer que la multiplicité des hypothèses est toujours présente, à la troisième étape de cette tripartition. Cela pourrait être possible non seulement parce que plusieurs hypothèses concurrentes peuvent être cohérentes avec les phénomènes (première étape), mais parce que, à la deuxième étape, le système S a également d'autres rivaux (S, S', \dots) de sorte qu'une hypothèse H' abduite de façon standard peut trouver une justification dans l'abduction inverse en vertu de la relation « $S' \Rightarrow H'$ ». Cela dit, en vertu de son réalisme, Kepler ne saurait envisager que plusieurs S soient possibles ; néanmoins, même si S est fondé

⁵⁹⁴ Inference to the Best Explanation.

⁵⁹⁵ MINNAMEIER (2004), p. 75.

⁵⁹⁶ Tel que mentionné dans la section 6.2 de cette thèse et appuyé par l'article de LUGG (1985).

⁵⁹⁷ À noter que l'appellation « première », « deuxième » et « troisième » ne signifie pas nécessairement qu'elles sont effectuées dans cet ordre temporel ou logique.

a priori en vertu de présupposés métaphysiques, théologiques ou archétypaux, il n'en doit pas moins trouver également une justification *a posteriori*, sans quoi on a un indice que l'on a trouvé le « mauvais » *S*. Nous avons vu précédemment⁵⁹⁸ que, selon Kepler, si plusieurs hypothèses sont concordantes avec les observations, il recherche alors ce qu'il y a de commun entre elles pour élaborer un *S* qui soit juste. Qui plus est, bon nombre de principes faisant partie de *S* (par exemple, l'adoption du Soleil vrai pour calculer les trajectoires puisqu'il est la source du mouvement) chez Kepler sont envisagés et testés selon différents modèles (Copernic, Tycho Brahe ou Ptolémée). Cela est inévitable puisqu'il est impossible de tester séparément un principe de *S* et de proposer un seul modèle *H* concordant avec ce principe isolé et vérifiable empiriquement, particulièrement en astronomie, où il est impossible de procéder à des expériences contrôlées en laboratoire, en fixant certains paramètres. Nous pourrions donc envisager, pour rendre compte de ce qui est exposé dans l'*Astronomia nova*, une dynamique de recherche où le système *S*, justifié d'abord *a priori*, se construit peu à peu et s'enrichit, au fur et à mesure que différents modèles (géométriques) qui peuvent en découler sont vérifiés empiriquement et en justifient les différents principes (physiques) de façon *a posteriori*. Les modèles astronomiques, lorsqu'ils sont envisagés eu égard à leur vérification empirique, ne sont que plausibles ; une multiplicité de modèles peuvent d'ailleurs correspondre à ce qui est observé. Mais lorsqu'on conçoit qu'ils dérivent d'un seul système *S*, il s'agit de trouver ce qu'il y a de commun entre ces modèles justifiés *a posteriori* pour éventuellement pointer ce qu'il y a de véritablement justifié *a posteriori* dans le système *S*. Éventuellement, un seul modèle (la forme elliptique des trajectoires, dont le Soleil est, selon la forme finale de la première loi de Kepler, l'un des foyers) est retenu, en vertu du fait qu'il correspond aux observations (justification *a posteriori*) et qu'il trouve son explication (justification *a priori*) dans le lien « $S \Rightarrow H$ ». L'exigence képlérienne de proposer une nouvelle astronomie, fondée sur les causes, correspond bien à cette dynamique, d'autant plus qu'elle précise la nature de *S* (principes physiques) et celle de *H* (démonstration géométrique); sa conception d'un monde créé selon des archétypes mathématiques rend bien compte de l'exigence de justifier également *a posteriori* ce *H* et de la possibilité qu'il puisse être abduit des phénomènes.

⁵⁹⁸ Tel que récapitulé à la section 5.3 et démontré au chapitre 4 de cette thèse.

La tripartition de Kleiner, si on y apporte les précisions ci-dessus, permet de bien comprendre le processus de justification des différentes étapes abductives ayant guidé Kepler au sein d'une logique de la découverte ayant produit des modèles et un système explicatif permettant d'expliquer les observations astronomiques. Il s'agit d'une véritable dialectique entre *explananda* et *explanans* : différents modèles H peuvent être adoptés provisoirement en vertu de leurs liens avec les *explananda* et l'*explanans*, ce dernier étant à la fois justifié *a priori* et vérifiable à partir de différents modèles H réfutables *a posteriori*.

Selon moi, il reste toutefois une autre étape abductive à rendre explicite. Effectivement, si l'on reprend le modèle de Hanson appliqué différemment tel que décrit en « f », nous voyons que S peut être inféré en vertu de sa correspondance avec le modèle H , lui-même abduit à partir des phénomènes ; or si l'on se souvient de l'exigence képlérienne de fonder la physique ultimement dans les mathématiques, on peut interpréter le lien « $S \Rightarrow H$ » comme la prémisse d'un raisonnement permettant de justifier, *a priori*, le système explicatif puisqu'il peut trouver une description géométrique H (qu'elle ait été ou non confrontée aux données d'observation). Cela correspond bien à la théorie des archétypes : le monde physique trouve son explication ultime dans des structures mathématiques, et ces structures sont une propriété essentielle des objets ; tout système physique S ne pouvant pas être décrit de façon mathématique selon un modèle H sera donc à rejeter, alors que, dans le cas contraire, nous aurions de bonnes raisons d'envisager S s'il permet d'engendrer un tel modèle H . Nous pourrions donc proposer cette quatrième étape abductive, qui ne remplacerait pas les abductions exposées précédemment mais qui pourrait s'y rajouter :

k) Abduction standard effectuée à partir du lien entre le système S et sa description géométrique H :

1. $S \Rightarrow H$
2. $S \Rightarrow (S \Rightarrow H)$
3. Donc S .

Malgré les apparences et le fait qu'elles aient la même prémisse #1, il ne faut pas confondre les raisonnements « g » et « k ». Nous ne pourrions d'ailleurs pas qualifier l'abduction en « k » d'inverse puisqu'elle permet réellement de remonter jusqu'au système explicatif, donc de

suivre un processus véritablement anagogique. Toutefois, considérer « g » et « k » nous permet de bien voir le réel pouvoir du lien « $S \Rightarrow H$ », à la fois heuristique et justificateur, en l'envisageant comme une prémisse nous permettant d'inférer à la fois S et H avant même qu'il y ait eu une vérification avec les phénomènes P .

Une question demeure, toutefois : si nous acceptons, comme Kleiner, qu'il y ait plusieurs étapes abductives de différentes formes, laquelle est véritablement première au sein du processus de découverte ? Nous pouvons écarter l'étape abductive comparative (formulée en « j ») puisqu'elle présuppose différentes hypothèses préalablement abduites parmi lesquelles on effectue un choix, mais il nous reste encore deux candidates intéressantes : l'étape abductive standard (qui infère H à partir de P , comme en « h ») et les étapes abductives qui n'incluent pas les phénomènes P (qui infèrent H ou S à partir de « $S \Rightarrow H$ », comme en « g » ou « k »). En d'autres termes, il s'agit de déterminer quel est le véritable point de départ de l'abduction, si tant est qu'il soit possible d'en déterminer un au sein de cette dialectique. C'est pour nous aider à éclairer cette question que nous allons discuter maintenant des propos de Johan Arnt Myrstad, qui explore l'utilisation de l'abduction inverse chez Kepler.

6.4. L'abduction inverse de Myrstad

Myrstad, dans son article intitulé "The Use of Converse Abduction in Kepler", propose de comprendre l'ensemble du processus képlérien comme une méthode de découverte employant essentiellement l'abduction inverse. Dans son texte, Myrstad fait souvent référence au processus de découverte de Kepler tel qu'exposé dans l'*Astronomia nova*, mais nous pouvons soupçonner qu'il s'est essentiellement fondé sur des sources secondaires pour effectuer son analyse, comme en témoignent l'absence de citation directe aux textes képlériens (absents en bibliographie, tant en latin qu'en traduction anglaise) et surtout l'évocation de la « *Metaphysica Cosmographica* »⁵⁹⁹ pour référer au MC ⁶⁰⁰ analysé par Kleiner. Néanmoins, l'interprétation de Myrstad a le mérite de mettre l'accent sur l'importance de tenir compte de la hiérarchie entre les différents principes ayant joué un rôle dans les recherches de Kepler.

⁵⁹⁹ MYRSTAD (2004), p. 335.

⁶⁰⁰ Notons que ce n'est pas l'erreur de Kleiner puisque ce dernier précise, à la note 29 dans KLEINER (1983), p. 287, que MC désigne la traduction anglaise du *Mysterium Cosmographicum*.

C'est d'ailleurs un reproche qu'il fait à Kleiner : « Though Kleiner has a fairly detailed account of the methodical features of Kepler's approach, he pays too little attention to the hierarchical order between geometrical, kinematical and dynamical considerations and their interrelations. »⁶⁰¹ Il est vrai que Kleiner se contente de juxtaposer trois types de raisonnements abductifs chez Kepler, sans préciser lequel prime sur les deux autres⁶⁰². Selon Myrstad, c'est clairement l'abduction inverse qui caractérise la démarche képlérienne, abduction qu'il ne reconstruit pas sous une forme logique explicite mais qu'il décrit ainsi :

Thus, according to Kepler the dynamical principles must govern the demonstrations of both kinematical and geometrical relations of the planetary orbits. This kind of abduction is in a sense the **converse** of the Keplerian abduction from facts according to Peirce and Hanson, since it moves from the dynamical principles in the direction of a sanctioning of the description of the observations. This converse form of abduction [...] may be discerned as the central feature of his method [...].⁶⁰³

Selon moi, Myrstad a raison d'insister sur la primauté des considérations dynamiques sur la description géométrique des observations. Si nous reprenons les symboles que nous avons utilisés vers la fin de la section 6.3, il s'agit de mettre en valeur le fait que S est hiérarchiquement supérieur à H – ce qui va de soi si l'on se souvient des objectifs de la nouvelle astronomie, fondée sur les causes – et que, à son tour, H est hiérarchiquement supérieur à P dans la mesure où les observations ne peuvent être effectuées qu'à l'intérieur d'un modèle, découlant de S : « No estimation of the distances between the positions and the forms of the orbits is possible without a thorough organization of the observations in models of the planetary motions. »⁶⁰⁴ Selon cette interprétation, l'abduction standard de H à partir des phénomènes P est donc à rejeter, à moins de la conserver uniquement comme processus de justification survenant après-coup. Le cœur du raisonnement képlérien se comprendrait alors comme un processus permettant de « voir » dans les phénomènes, à partir d'un système S , la structure H qui permet de les regrouper.

⁶⁰¹ MYRSTAD (2004), p. 336.

⁶⁰² Par exemple, après avoir rappelé l'abduction standard (Hanson) de l'hypothèse à partir des phénomènes, Kleiner introduit l'abduction inverse ainsi : « Kepler also appears to attach **equal importance** to a second argument » KLEINER (1983), p. 311. Je souligne.

⁶⁰³ MYRSTAD (2004), p. 328.

⁶⁰⁴ MYRSTAD (2004), p. 324.

Cette interprétation n'est d'ailleurs pas très éloignée de celle de Kleiner, en ce que ce dernier met beaucoup l'accent, pendant l'entièreté de son article, sur la structure ou patron métaphysique (*<metaphysical blueprint>*) ayant guidé Kepler, tant dans sa conception de la science qu'il révolutionnait que dans la façon de la pratiquer tel qu'exposé dans l'*Astronomia nova*. De plus, en précisant ce qui est sous-entendu dans l'abduction inverse de Kleiner (retranscrite en « e ») et en développant ses implications, on obtient que H est bel et bien inféré en vertu de son lien avec le système S . La différence principale réside donc dans le fait que Kleiner juxtapose ce qui est soigneusement hiérarchisé chez Myrstad, lequel va jusqu'à écarter les autres formes abductives s'éloignant de l'abduction inverse.

6.5. Abduction et astronomie nouvelle

Pour ma part, je crois qu'il faut éviter de réduire la pensée képlérienne à un seul type d'abduction. Il me semble important de sauvegarder toutes les formes abductives pertinentes pour rendre compte des multiples inférences ayant joué un rôle dans les recherches képlériennes au sein de la dialectique entre système explicatif, description géométrique et observations astronomiques. Bien que cette dialectique implique une multiplicité de raisonnements produisant des conclusions uniquement « plausibles », elle n'en est pas moins logique et rationnelle. Néanmoins, s'il fallait réellement désigner le point de départ de la logique de la découverte chez Kepler, je rejetterais également les phénomènes, comme le fait Myrstad et contrairement à Hanson ; je favoriserais toutefois non pas les considérations dynamiques qui forment le contenu de S , mais le lien crucial entre système physique S et description géométrique H (« $S \Rightarrow H$ »), que nous avons retrouvé à plusieurs reprises dans les abductions précédentes et qui a permis de tenir lieu de prémisses de raisonnements extrêmement féconds. Viendrait ensuite le lien crucial entre la description géométrique et les observations dont elle doit rendre compte (« $H \Rightarrow P$ »), correspondant à l'exigence d'une justification *a posteriori* permettant de conserver provisoirement H . Ce sont ces deux liens qui ont permis à Kepler d'inférer, de façon provisoire, un système et une hypothèse qui ont pu ensuite se préciser au fur et à mesure que certaines parties de S se voyaient justifiées lorsque testées dans différents modèles H ; retrouver ce qu'il y avait de commun dans ces différents

modèles justifiés *a posteriori* a donné à Kepler un indice supplémentaire en faveur de l'adoption et de la conservation de ce principe à l'intérieur de *S*.

Ce sont ces deux exigences « $S \Rightarrow H$ » et « $H \Rightarrow P$ » qui me semblent avoir été les principes moteurs du processus de recherche exposé dans l'*Astronomia nova* et qui ont certainement permis de donner naissance à de nouvelles explications astronomiques, adoptées provisoirement en vertu d'une multiplicité d'abductions. Ces deux liens fondamentaux, envisagés comme prémisses logiques, me semblent également correspondre le mieux à la réelle nouveauté apportée par Kepler dans l'histoire de l'astronomie, objectif annoncé dès le titre complet de son ouvrage *Astronomia nova* : une astronomie nouvelle fondée sur les causes physiques.

Si la postérité n'a pas retenu l'ensemble du contenu du système *S* proposé par Kepler mais seulement certaines de ses parties qui ont été perçues comme une étape vers la science moderne proposée par Newton, il n'en demeure pas moins que c'est avec Kepler qu'est réellement née ce qui allait devenir l'astrophysique. Si le hasard a peut-être joué un certain rôle dans le contexte de découverte, il y a eu bel et bien, dans les arguments de l'*Astronomia nova*, une logique à l'œuvre que nous pouvons décliner selon plusieurs arguments abductifs donnant une large importance aux raisons *a priori* dans la dynamique entre *explanans* et *explananda*. Enfin, parce qu'elle a proposé une science astronomique allant au-delà d'une reconstruction géométrique et fondée sur une physique ultimement mathématique, ce qui allait permettre notamment d'abandonner les vieux dogmes circulaires ouranophysiques et d'adopter une conception héliodynamique du monde, la révolution képlérienne mérite une plus grande place dans les interprétations de la naissance de la science moderne.

Conclusion

Suite à cette étude attentive des raisons théoriques et empiriques impliquées dans l'élaboration d'une nouvelle astronomie par Kepler, nous pouvons mieux comprendre l'importance de son apport dans le développement de l'astronomie et, ce faisant, mieux en saisir le caractère révolutionnaire. Plus précisément, cette thèse nous a permis de voir comment Kepler a posé les assises d'une nouvelle discipline mixte pouvant étudier le mouvement céleste de façon géométrique tout en se fondant sur les causes du mouvement, à rechercher dans la physique. L'approche abductive nous a permis d'interpréter l'itinéraire rationnel képlérien dans toute sa richesse et sa complexité, en permettant de produire logiquement une conclusion uniquement « plausible », ce qui semble être une condition inévitable pour la recherche en astronomie, science dont l'objet se situe à la limite de la portée de notre perception sensorielle et qui inclut un grand volet spéculatif. Cette approche logique nous a permis de tenir compte de l'exigence d'une astronomie fondée sur les causes en l'interprétant comme une prémisse essentielle au cœur des diverses inférences abductives déployées en cours de route. Ainsi, les fondements métaphysiques, théologiques et philosophiques se sont vus octroyer un rôle essentiel, à la fois heuristique et justificateur, lors des diverses étapes de l'*Astronomia nova*, tout comme l'exigence de concordance avec les données observationnelles.

Dans la première partie de cette thèse, qui a touché de près aux textes mêmes de Kepler, nous avons commencé, au chapitre 1, par mettre en lumière son projet et ses objectifs tels qu'exposés dans son premier ouvrage, le *Mysterium cosmographicum*. Ces questions directrices et cosmographiques, à la base d'une science dont l'objectif va bien au-delà d'une simple reconstruction des mouvements célestes, sont toujours valides (bien qu'implicites) dans l'*Astronomia nova*. Ce fut l'occasion de présenter également les arguments *a priori* soutenant l'adoption de l'héliocentrisme ainsi que la théorie des archétypes, deux positions cruciales au sein de la nouvelle astronomie proposée par Kepler.

Le chapitre 2 a été l'occasion de s'intéresser aux propos explicites de Kepler quant à la nature et à la méthode de la science astronomique, tels que nous les retrouvons dans un traité non publié de son vivant, l'*Apologia pro Tychone contra Ursum*. Nous avons vu une autre

formulation de l'exigence d'une astronomie réaliste, à la fois adéquate empiriquement et fondée *a priori*. Nous avons vu également comment Kepler répondait au problème de la concordance des hypothèses et des données observationnelles auquel sa théorie réaliste prêtait le flanc.

Le chapitre 3 a permis de mettre en lumière les diverses sources ayant influencé Kepler dans son élaboration d'une nouvelle astronomie ou physique céleste *aitiológêtos*. Pour chacune des sources retenues (Aristote, Platon, Pythagoriciens, Néo-platoniciens, Euclide, Archimède, Apollonius, Pappus d'Alexandrie et William Gilbert), nous avons mis en lumière à la fois ce que Kepler semblait avoir retenu de ces auteurs et ce qu'il en avait critiqué pour construire sa nouvelle astronomie. Ce tour d'horizon des sources était essentiel pour saisir en quoi consistait précisément la nouveauté de l'astronomie proposée par Kepler et pour nous préparer à la lecture de l'*Astronomia nova*, dont les arguments scientifiques trouvaient une forme de justification dans ces sources. Cela nous a permis notamment de réviser l'idée traditionnelle selon laquelle la révolution astronomique (débutée par Copernic et achevée avec Newton) devait se comprendre comme un pur rejet de l'aristotélisme de l'époque. Nous avons vu également que les idées néoplatoniciennes de Kepler, parfois jugées étranges ou mystiques par les historiens des sciences, ne devaient pas être écartées pour autant si l'on souhaitait obtenir un portrait plus juste de l'apport de Kepler, chez qui ces idées jouèrent un rôle crucial dans la conception, le développement et le fondement d'une connaissance mathématique de la nature.

Le chapitre 4 a proposé une analyse détaillée des arguments scientifiques de l'*Astronomia nova*. L'accent a été mis sur les diverses étapes argumentatives et les raisons *a priori* et *a posteriori* impliquées dans le processus de découverte et de justification des différents principes de la nouvelle astronomie. Nous avons vu notamment que les objectifs de Kepler, jumelés à ses spéculations physiques, l'avaient amené à proposer un système héliodynamique, ce qui était un pas essentiel vers la loi des distances. La loi des distances était un prélude à la loi des aires, cette dernière étant envisagée dans l'*Astronomia nova* comme un moyen de calcul de l'influence du Soleil, influence compréhensible de façon mathématique en suivant une analogie avec la lumière et le magnétisme. Quant à la loi des aires, elle était nécessaire pour que Kepler puisse envisager d'abord, puis justifier ensuite la forme elliptique de la trajectoire des planètes du moment qu'il était établi que la première engendrait la

deuxième. Malgré un certain tâtonnement empirique et une certaine forme de heureux hasard, l'établissement de la trajectoire elliptique des planètes ne peut donc pas s'interpréter comme une simple découverte à partir des données d'observation, c'est-à-dire en faisant l'économie du rôle heuristique et justificateur des diverses considérations dynamiques qui, bien que n'ayant pas été retenues par la postérité, n'en ont pas moins été essentielles pour la nouvelle astronomie. Enfin, nous avons vu que Kepler pouvait tester empiriquement une même hypothèse en utilisant différents modèles, afin d'établir peu à peu les principes de son système explicatif et de la description géométrique qui lui est reliée.

Dans la seconde partie de cette thèse, nous avons cherché à interpréter logiquement le processus de découverte et de justification chez Kepler par le biais de la notion d'abduction. Afin de mieux comprendre la dialectique entre le système explicatif (*explanans*) et les observations (*explananda*), de même que le processus de découverte et de justification d'hypothèses plausibles, nous avons commencé par étudier, au chapitre 5, trois approches (Platon, Aristote, Épicuriens) quant à la connaissance scientifique des phénomènes célestes, permettant d'obtenir un discours vraisemblable ou une multiplicité d'explications concordantes avec les phénomènes.

Enfin, le chapitre 6 a été l'occasion de présenter, reformuler, critiquer et appliquer d'une façon parfois différente les diverses interprétations abductives de la démarche déployée dans l'*Astronomia nova* proposées par Peirce, Hanson, Kleiner et Myrstad. Il en est ressorti que différents types de raisonnements abductifs étaient à l'œuvre dans ce processus et qu'il était important de tenir compte du rôle de l'appareil théorique dans la production et la justification des principes physiques et descriptions géométriques permettant de s'accorder, de façon plausible, avec les phénomènes. Il a été proposé que le lien même entre système explicatif et description géométrique d'une part, et le lien entre cette dernière et les phénomènes d'autre part, avaient joué le principal rôle dans cette dynamique entre *explanans* et *explananda* au sein d'une logique abductive se déclinant sous plusieurs formes. Or ces deux liens correspondent exactement au projet même de Kepler, soit celui d'élaborer une astronomie nouvelle fondée sur les causes.

Éventuellement, ces deux liens se retrouveraient incorporés dans une conception harmonique du monde, qui serait développée plus tard dans l'*Harmonice mundi*. C'est d'ailleurs seulement à ce moment que Kepler considèrera avoir enfin achevé sa quête du

mystère cosmographique, formulant au passage sa célèbre troisième loi, reliant la période d'une planète à sa distance moyenne au Soleil.

Il n'en demeure pas moins que l'*Astronomia nova* est considéré, avec raison, comme un ouvrage marquant dans l'histoire de l'astronomie. Au cours de notre étude, il a été montré que la portée de l'ouvrage dépassait largement les deux lois du mouvement planétaire que les scientifiques ont retenues, et que l'on devrait parler davantage de « révolution képlérienne » que de « révolution copernicienne » pour désigner le passage d'un système géocentrique à un système non pas héliocentrique (Copernic) mais héliodynamique, nous faisant abandonner ensuite, pour de bon, le paradigme des orbites circulaires.

Un autre apport important de l'*Astronomia nova* est de nous avoir donné un exemple particulièrement instructif d'une démarche féconde et rationnelle, produisant et justifiant de nouveaux principes explicatifs et descriptifs en astronomie. Il serait intéressant de poursuivre cette étude auprès d'autres scientifiques afin de nourrir le débat en philosophie des sciences ou en logique de la découverte. C'est ce qu'a fait notamment William A. Wallace dans son ouvrage *Galileo's Logic of Discovery and Proof*⁶⁰⁵, où il étudie les types de raisonnements aristotéliens utilisés par Galilée dans sa méthode scientifique. Néanmoins, nous retrouvons souvent en philosophie des sciences ou en logique de la découverte une description plutôt réduite de certaines découvertes en histoire des sciences, qui sont souvent citées en exemple pour illustrer différentes formes de raisonnement mais qui se trouvent, au passage, reconstruites sans tenir compte du réel cheminement intellectuel suivi par leurs auteurs ni des fondements de leur pensée. Je souhaite que cette thèse sur l'astronomie nouvelle de Kepler nous permette de mieux apprécier, dans toute sa richesse et sa complexité, la rationalité et le génie qui ont rendu possible la naissance de l'astrophysique.

⁶⁰⁵ Cf. WALLACE (1992).

Bibliographie

AITON, Eric J. (1969). "Kepler's Second Law of Planetary Motion". *Isis*, Vol. 66, No. 1, pp. 75-90.

ALISEDA, Atocha (2006). *Abductive Reasoning*. Dordrecht : Springer.

APOLLONIUS (1963). *Les Coniques d'Apollonius de Perge*. Trad. par Paul Ver Eecke. Paris : A. Blanchard.

ARISTOTE (1946). *Organon III : Les Premiers analytiques*. Trad. par J. Tricot. Paris : Vrin.

- (1991). *Métaphysique*. Trad. par J. Tricot. Paris : Vrin, 2 vol.

- (2000). *Physique*. Traduction par P. Pellegrin. Paris : Flammarion.

- (2003). *Du ciel*. Trad. par P. Moraux. Paris : Les Belles Lettres.

- (2005). *Seconds analytiques*. Trad. par P. Pellegrin. Paris : Flammarion.

- (2008). *Météorologiques*. Trad. par J. Groisard. Paris : Flammarion.

ASMIS, Elizabeth (1984). *Epicurus' Scientific Method*. Ithaca (N.Y.) : Cornell University Press.

BARKER, Peter et GOLDSTEIN, Bernard R. (2001). "Theological Foundations of Kepler's Astronomy". *Osiris*, 2nd Series, Vol. 16, pp. 88-113.

BRISSON, Luc et MEYERSTEIN, F. Walter (1991). *Inventer l'univers*. Paris : Les Belles Lettres.

CASPAR, Max ([1959] 1993). *Kepler*. Trad. par C.D. Hellman. New York : A.-Schumann.

COPERNIC, Nicolas ([1543] 1966). *De revolutionibus orbium caelestium : libri VI*. Bruxelles: Culture et civilisation. Fac-sim. de l'édition de Norimbergae : J. Petreium.

DAVIS, A.E.L. (1992). "Kepler's Physical Framework for Planetary Motion". *Centaurus*, Vol. 35, pp. 165-190.

- (1998). "Kepler's Unintentional Ellipse : A Celestial Detective Story". *The Mathematical Gazette*, Vol. 82, No. 493, pp. 37-43.

- (2011). "Celestial Geometry in the *Astronomia nova*". In *Kepler : la physique céleste*. Paris : Les Belles Lettres, pp. 83-95.

DIEDERICH, Werner (2001). "The Structure of the Copernican Revolution". *Diálogos*, Vol. 36, No. 77, pp. 7-24.

DONAHUE, William H. (1993). "Kepler's First Thoughts on Oval Orbits: Text, Translation, and Commentary". *Journal for the History of Astronomy*, Vol. 24, pp. 71-100.

DUHEM, Pierre ([1908] 2003). *Sauver les phénomènes : Essai sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée*. Paris : Vrin.

DREYER, John Louis Emil ([1906] 1953). *A History of Astronomy from Thales to Kepler*. New York : Dover.

ÉPICURE (1987). *Lettres et Maximes*. Trad. par M. Conche. Paris : Presses universitaires de France.

ESCOBAR, Jorge M. (2008). "Kepler's Theory of the Soul: A Study on Epistemology". *Studies in History and Philosophy of Science*, Vol. 39, pp. 15-41.

EUCLIDE (1969). *Elementa*. Vols. 1-3. Leipzig : Teubner BSB.

FANN, K.T. (1970). *Peirce's Theory of Abduction*. The Hague : Martinus Nijhoff.

FIELD, Judith Veronica (1988). *Kepler's Geometrical Cosmology*. Chicago : University of Chicago Press.

FLUDD, Robert (1621). *Utriusque Cosmi Maioris scilicet Minoris Metaphysica, Physica atque technica Historia*, Oppenheim.

GILBERT, William (1600). *De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure: physiologia nova, plurimis & argumentis, & experimentis demonstrata*. Londini : excudebat Petrus Short.

GINGERICH, Owen (1975). "Kepler's Place in Astronomy". In *Kepler: Four Hundred Years*, ed. A. Beer et P. Beer. *Vistas in Astronomy*, vol. 18. New York : Pergamon Press, pp. 261-278.

- (2002). "Kepler Then and Now". *Perspectives on science*, Vol. 10, No. 2, pp. 228-240.

- (2003). "Johannes Kepler". In *Planetary astronomy from the Renaissance to the Rise of Astrophysics ; General History of Astronomy*, Vol. 2A, ed. R. Taton et C. Wilson, Cambridge : Cambridge University Press, pp. 54-78.

GOLDSTEIN, Bernard R. et HON, Giora (2005). “ Kepler’s Move from Orbs to Orbits : Documenting a Revolutionary Scientific Concept”. *Perspectives on Science*, Vol. 13, No. 1, pp. 74-111.

HALLYN, Fernand (1987). *La structure poétique du monde : Copernic, Kepler*. Paris : Seuil.

HANSON, Norwood Russell ([1958] 1965). *Patterns of Discovery*. Cambridge : Cambridge University Press.

- (1961). “The Copernican Disturbance and the Keplerian Revolution”. *Journal of the History of Ideas*, Vol. 22, No. 2, pp. 169-184.

HARMAN, Gilbert (1965). “The Inference to the Best Explanation”. *Philosophical Review*, Vol. 74, pp. 88-95.

JARDINE, Nicholas (1984). *The Birth of History and Philosophy of Science : Kepler’s A defence of Tycho against Ursus with essays on its provenance and signifiante*. New York : Cambridge University Press.

KEPLER, Johannes (1858-1870). *Opera omnia*. Éd. C. Frisch, Frankofurti & Erlangae : Heyder und Zimmer.

- ([1596/1621] 1981). *Mysterium Cosmographicum. The Secret of the Universe*. Trad. A.M. Duncan. New York : Abaris Books.

- ([1596/1621] 1984). *Le secret du monde*. Trad. A. Segonds. Paris: Gallimard.

- ([1604] 2000). *Optics, Paralipomena to Witelo & Optical Part of Astronomy*. Trad. W.H. Donahue. Santa Fe, New Mexico: Green Lion Press.

- ([1609] 1929). *Neue Astronomie*. Trad. M. Caspar. Munich: R. Oldenbourg.

- ([1609] 1979). *Astronomie nouvelle*. Trad. J. Peyroux. Paris : éd. A. Blanchard.

- ([1609] 1992). *New Astronomy*. Trad. W. H. Donahue. Cambridge: Cambridge University Press.

KLEINER, Scott A. (1983). “A New Look at Kepler and Abductive Argument”. *Studies In History and Philosophy of Science*, Vol. 14, No. 4, pp. 279-313.

KOESTLER ([1959] 1989). *The Sleepwalkers*. London / New York : Arkana.

KOYRÉ, Alexandre (1961). *La révolution astronomique*. Paris : Hermann.

- (1973a). *Du monde clos à l'univers infini*. Trad. R. Tarr. Paris: Gallimard.
- (1973b). *Études d'histoire de la pensée scientifique*. Paris : Gallimard.

KOZHAMTHADAM, Job (1994). *The Discovery of Kepler's Laws : The Interaction of Science, Philosophy, and Religion*. Notre Dame et Londres : University of Notre Dame Press.

KRAFFT, Fritz (1991). "The New Celestial Physics of Johannes Kepler". In *Physics, Cosmology and Astronomy, 1300-1700 : Tension and Accommodation*. Sous la dir. de Sabetai Unguru. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, pp. 185-227.

KUHN, Thomas S. (1973). *La révolution copernicienne*. Trad. par A. Hayli. Paris : Fayard.

LONG, A.A. et SEDLEY, D.N. (2001). *Les philosophes hellénistiques*. Trad. par J. Brunschwig et P. Pellegrin. Paris : GF Flammarion, 3 vol.

LUCRÈCE (1993). *De la nature*. Trad. par J. Kany-Turpin. Paris : Aubier.

LUGG, Andrew (1985). "The Process of Discovery". *Philosophy of Science*, vol. 52, pp. 207-220.

MARION, Jean-Luc (1981). *Sur la théologie blanche de Descartes. Analogie, création des vérités éternelles et fondement*. Paris : Presses universitaires de France.

MARTENS, Rhonda (2000). *Kepler's Philosophy and the New Astronomy*. Princeton : Princeton University Press.

MAXWELL, Nicholas (1974). "The Rationality of Scientific Discovery". *Philosophy of Science*, vol. 41, pp. 123-153 et pp. 247-295.

METHUEN, Charlotte (1998). *Kepler's Tübingen : Stimulus to a Theological Mathematics*. Hampshire : Ashgate.

MILL, John Stuart ([1858] 1958). *A System of Logic*. In *The Collected Works of John Stuart Mill*, ed. par J.M. Robson. London : Routledge and Kegan Paul.

MILLER, David Marshall (2008). "O male factum : Rectilinearity and Kepler's Discovery of the Ellipse". *Journal for the History of Astronomy*, Vol. 39, pp. 43-63.

MINNAMEIER, Gerhard (2004). "Peirce-Suit of Truth – Why Inference to the Best Explanation and Abduction Ought Not to be Confused". *Erkenntnis*, vol. 60, pp. 75-105.

MOREL, Pierre-Marie (2000). *Atome et nécessité. Démocrite, Épicure, Lucrèce*. Paris : Presses universitaires de France.

- MYRSTAD, Johan Arnt (2004). "The Use of Converse Abduction in Kepler". *Foundation of Science*, Vol. 9, pp. 321-338.
- NEWTON, Isaac ([1687] 1972). *Philosophiæ naturalis principia mathematica*. Vols. 1-2. Cambridge : The University Press.
- NIINILUOTO, Ilka (1999). "Abduction and Geometrical Analysis. Notes on Charles S. Peirce and Edgar Allan Poe". In *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery*. Sous la dir. de L. Magnani, N.J. Nersessian et P. Thagard. New York : Kluwer Academic / Plenum Publishers, pp. 239-254.
- PAPPUS (1933). *La Collection mathématique*. Trad. par P. Ver Eecke. Paris : Desclée, 2 vol.
- PAULI, Wolfgang ([1952] 2002). *Le cas Kepler*. Trad. par M. Carlier. Paris : Albin Michel.
- PEIRCE, Charles Sanders (1931-1958). *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*. Vols. 1-6, éd. par C. Hartshorne et P. Weiss; vols. 7 et 8, éd. par A.W. Burks. Cambridge : Harvard University Press.
- PLATON (1950). "Timée". Trad. par L. Robin. In *Œuvres complètes*, vol. II. Paris : Gallimard (Pléiade).
- POPPER, Karl (1975). "The Rationality of Scientific Revolutions". In *Problems of Scientific Revolutions*. Sous la dir. de R. Harré. Oxford: Clarendon Press, pp. 72–101.
- REICHENBACH (1938). *Experience and Prediction; an Analysis of the Foundations and the Structure of Knowledge*. Chicago : The University of Chicago Press.
- RIVERIN, Céline (2007). *Épistémologie du concept d'harmonie dans les recherches scientifiques de Kepler* (Mémoire de maîtrise inédit). Université de Montréal.
- SAKELLARIOU, Vassilis (2011). "Restoring Continuity in Theory Change : The Kepler-to-Newton Case". *Journal for General Philosophy of Science*, Vol. 42, No. 1, pp. 109-127.
- SALEM, Jean (1997). *L'atomisme antique. Démocrite, Épicure, Lucrèce*. Paris : Librairie Générale Française.
- SCHMITT, Charles B. (1975). "Philosophy and Science in Sixteenth-Century Universities : Some Preliminary Comments." In *The Cultural Context of Medieval Learning*, ed. J.E. Murdoch et E.D. Sylla, pp. 485-537. Dordrecht : D. Reidel.
- SIGGEN, Michel (2005). *La méthode expérimentale selon Aristote : Reconstruction doctrinale de l'épistémologie aristotélicienne*. Paris : Les Presses universitaires de l'IPC.
- SIMON, Gérard (1979). *Kepler astronome astrologue*. Paris : Gallimard.

- (1996). *Sciences et savoirs aux XVI^e et XVII^e siècles*. Paris : Septentrion.

SMALL, Robert ([1804] 1963). *An Account of the Astronomical Discoveries of Kepler*. Madison : University of Wisconsin Press.

STEPHENSON, Bruce (1987). *Kepler's Physical Astronomy*. Princeton : Princeton University Press.

STRONG, Edward William (1966). *Procedures and metaphysics ; a study in the philosophy of mathematical-physical science in the sixteenth and seventeenth centuries*. Hildesheim : Georg Olms.

VERDET, Jean-Pierre (1990). *Une histoire de l'astronomie*. Paris : Le Seuil.

VOELKEL, James R. (2001). *The Composition of Kepler's Astronomia Nova*. Princeton & Oxford : Princeton University Press.

WHEWELL, William (1849). *Of Induction, With Especial Reference to Mr. J. Stuart Mill's System of Logic*. London : John W. Parker.

-([1857] 1967). *History of the Inductive Sciences : from the Earliest to the present time*. London : Cass, 3 vol.

YATES, Frances A. ([1964] 1971). *Giordano Bruno and the Hermetic Tradition*. London : Routledge and Regan Paul.

WALLACE, William A. (1992). *Galileo's Logic of Discovery and Proof*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers.

WESTMAN, Robert S. (1972). "Kepler's Theory of Hypothesis and the 'Realist Dilemma' ". *Studies in History and Philosophy of Science*, Vol. 3, No.3, pp. 233-264.

WILSON, Curtis A. (1968). "Kepler's Derivation of the Elliptical Path". *Isis*, Vol. 59, No. 1, pp. 4-25.

- (1970). "From Kepler's Laws, So-called, to Universal Gravitation : Empirical Factors". *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 6, pp. 89-170.