

## **Index**

### **Introduction**

#### **Chap. 1 - Ciels archaïques**

- 1 | Regardons autour de nous
- 2 | Le phénomène des mégalithes
- 3 | Le mouvement diurne du soleil
- 4 | Le terme nord
- 5 | Terre plate (mais que fait le soleil la nuit ?)
- 6 | La terre sphérique
- 7 | Comment savons-nous que la Terre est sphérique ?
- 8 | Astronomie égyptienne.
- 9 | Astronomie Babylonienne

#### **Chap. 2 - Le mécanisme des mouvements planétaires**

- 1 | L'hellénisme.
- 2 | La bibliothèque d'Alexandrie.
- 4 | La rétrogradation des planètes
- 5 | Héliocentrisme ?
- 6 | La machine d'Anticythère
- 7 | Hipparque et la précession des équinoxes
- 8 | La disparition du savoir hellénistique

#### **Chap. 3 - Tables planétaires**

- 1 | La tentative de Boèce
- 2 | Astronomie islamique
- 3 | L'astronomie dans l'Europe latine
- 4 | Astronomie indienne
- 5 | Manuscrits perdus

#### **Chap. 4 - Révolutions**

- 1 | La révolution géographique.
- 2 | La révolution Copernicienne

## Introduction

En écrivant ce livre, *Les idées de l'Astronomie*, je me suis proposé de fournir un instrument qui puisse rassembler tout le matériel hétérogène dont je me suis servi pour mes leçons qui s'adressaient aux lycéens que j'ai faites dans le cadre du Planétarium de Milan. De nombreux enseignants et étudiants me demandaient comment pouvoir retrouver les sujets traités, mais il m'était difficile d'indiquer un texte qui couvre tous les thèmes, à vrai dire très éloignés les uns des autres. J'espère avoir réussi dans mon intention de rassembler en un seul exposé ces sources.

C'est pourquoi, étant donné la genèse de cette œuvre, je ne revendique aucune prétention d'originalité sinon, partiellement au moins, en ce qui concerne l'approche et le choix de tels arguments. Naturellement *Les idées de l'Astronomie* s'adresse à un public bien plus large que les étudiants qui ont assisté aux leçons sous la voûte étoilée du Planétarium. Celui qui est un tout petit peu curieux de savoir comment l'astronomie a formé le monde dans lequel nous vivons pourra le trouver utile.

C'est en fait le but de ce premier volume : il n'aurait pas été raisonnable d'écrire un autre traité d'Astronomie dans le sens le plus traditionnel ; les étudiants ont déjà leurs livres de texte et le public peut repérer des ouvrages d'excellent niveau ; ce livre est plutôt conçu comme une sorte de carte routière qui en parcourant les millénaires, nous entraîne dans un voyage à travers l'image de l'univers que les différentes civilisations ont développée

Il y a des aspects qui ne seront pas particulièrement approfondis et ceci a encore à voir avec la tentative d'écrire quelque chose de complémentaire aussi bien que facilement repérable. De toute façon le *trait d'union* est toujours la recherche de concepts suggérés par l'observation du ciel qui ont profondément marqué l'histoire et la culture, peut-être même sélectionnés selon une sensibilité plus moderne face aux thèses plus conventionnelles de l'historiographie.

Une série de « fenêtres » ont le but d'approfondir des questions intéressantes mais un peu latérales par rapport au sujet développé. Parmi celles-ci, il y a plusieurs étymologies qui, j'en suis convaincu, doivent être aujourd'hui recherchées dans les plus lointaines racines Proto-Indo-européennes, et non plus limitées au latin et au grec. Toujours à propos des questions linguistiques, vous trouverez les mots « soleil », « lune » et « terre » parfois avec la minuscule et parfois avec la majuscule. Cela est dû à la sémantique différente de l'emploi de ces mots. Si « terre » signifie « le lieu où on marche » il ne faut pas le comprendre comme un nom propre et donc il sera écrit avec une minuscule, et c'est le contexte dans lequel il est surtout employé dans les premiers paragraphes. En fait Soleil, Terre et Lune sont des noms propres quand ils indiquent des corps célestes, mais il faut écrire en minuscules en dehors d'un contexte strictement scientifique. C'est du moins l'opinion que j'ai faite mienne de Aldo Gabrielli (*Se dit ou ne se dit pas ?* Mondadori, 1969)

Ce livre est distribué avec la licence *Creative Commons*. Les licences du type *Creative Commons* permettent à tous ceux qui détiennent des droits de copyright de transmettre plusieurs de ces droits au public et de conserver les autres grâce à

différents types de licences et de contrats qui permettent de faire passer un bien privé au domaine public L'intention est celle d'éviter les problèmes que les lois actuelles sur le copyright créent pour la diffusion et le partage des informations

*Les idées de l'astronomie* ne pourra donc jamais être vendu. Personnellement, je n'ai rien contre le droit d'auteur bien qu'il soit indéniable que le copyright ait conduit à des abus. J'ai beaucoup reçu, comme tout le monde de ceux qui m'ont précédé dans l'histoire, et je me fais une sorte de devoir de transmettre ce patrimoine.

Donc chargez ce livre, mais surtout lisez-le, imprimez-en ne serait-ce qu'un seul chapitre à la fois pour le lire dans le tram, en écrivant vos gloses les plus personnelles, en approfondissant les thèmes traités et en les commentant avec d'autres personnes ! Il est écrit pour vous.

Un vrai remerciement à mon neveu Andrea Masella qui a fait la mise en page avec LATEX; à Mogi Vicentini à qui je dois plusieurs illustrations

Un merci tout particulier à Fabio Peri, infatigable Conservateur du Planétarium de Milan ; c'est lui qui a fait en sorte que, jour après jour, les conférences au Planétarium atteignent leur niveau actuel.

Il faut aussi remercier les nombreux utilisateurs de *Wikimedia Commons* pour les illustrations que j'ai pu utiliser ; chacun d'entre eux est cité dans les légendes.

Milan Janvier 2010

# Chap. 1 - Ciels archaïques

## 1 | Regardons autour de nous

C'est une belle journée de soleil. Nous décidons d'aller dehors et autour de nous, il n'y a rien, notre regard s'étend à perte de vue. Nous pourrions être dans un désert ou une prairie ; tout autour de nous, il y a seulement l'horizon et au-dessus le ciel. Observons le soleil et si nous avons la patience d'attendre, on s'aperçoit qu'il s'est légèrement déplacé, c'est-à-dire que l'ombre que nous projetons sur le sol a bougé. Si après nous pouvons attendre plus longtemps, nous pourrions voir que le soleil s'est abaissé au point de toucher l'horizon. Et même, depuis le moment où le soleil est un petit disque dans le ciel de dimensions appréciables, nous pouvons suivre avec calme sa disparition progressive sous l'horizon. C'est une expérience simple, mais d'une certaine manière insolite. Quand le soleil est désormais sous l'horizon la lumière du ciel bleu s'affaiblit et il fait sombre. C'est la nuit.

Figure 1.1 – Arc diurne du Soleil dans les deux solstices observé par une latitude de 50° nord (Wikimedia Commons ; user Tau'olunga)

Une expérience semblable à celle-ci fait partie du patrimoine des hommes et des femmes de tous les temps, depuis les époques les plus reculées. Si nous pensons au nombre de problèmes auxquels nous avons assisté, nous nous apercevons que nous avons observé l'espace (c'est-à-dire l'horizon, la limite entre le ciel et la terre) et le temps (perçu grâce aux mouvements du soleil dans le ciel). Nous pourrions répéter le jour suivant la même observation, mais cette fois nous décidons de nous réveiller tôt, avant même le lever du soleil. Nous verrons ainsi le passage de l'obscurité de la nuit à la clarté du jour et nous identifierons le point précis de l'horizon où le soleil est apparu.

Observons pendant plusieurs heures le soleil se lever lentement à l'horizon et atteindre un point haut dans le ciel. Après ce sommet, d'abord imperceptiblement, nous remarquons que le soleil commence à décliner vers l'autre partie de l'horizon. Nous avons donc observé le point qui indique la moitié du chemin du soleil dans le ciel. Il est midi. Après cet apex l'astre du jour rejoindra l'horizon. Récapitulons. Nous avons identifié trois points significatifs appartenant à l'horizon qui sont déterminés par le soleil :

- le point où le soleil se lève
- le point exactement au-dessus duquel le soleil a rejoint sa plus grande hauteur à midi
- le point où le soleil se couche

Cela a été fatigant, surtout ennuyeux, attendre tout ce temps, mais nous sommes sûrement fiers de nous : nous avons découvert des points de l'horizon lointain qui doivent être évidemment d'une certaine importance.

Mais comme tout le monde, nous avons nous aussi, des affaires à suivre et nous oublions quelque temps cette observation du soleil et de l'horizon. Entre temps le soleil s'est levé et couché de nombreuses fois, disons cent fois, jusque à

une nuit où justement nous n'arrivons pas à dormir, nous décidons de nous lever de bonne heure pour aller tant qu'à faire voir le soleil se lever juste à ce point de l'horizon où nous l'avons identifié en son temps. Il arrive cependant quelque chose d'imprévu. Au moment de l'aube, le soleil ne se lève pas où on l'attendait, mais à un tout autre point de l'horizon. Intrigués par ce comportement du soleil, nous continuons à l'observer pendant toute la journée pour voir si se manifestent d'autres déviations de nos prévisions.. Arrive midi et le soleil culmine juste au même point, c'est-à-dire juste comme la fois précédente, il y a cent jours. Rien d'anormal à enregistrer. Maintenant il s'agit de vérifier que tout se passe comme la fois précédente au coucher du soleil aussi. Et là nous attend une autre surprise : le point à l'horizon où le soleil se couche est déplacé par rapport à celui d'il y a cent jours. Nous avons appris cependant quelque chose de très important. Tandis que les points du lever et du coucher sont différents, voici que au contraire le point de l'horizon au-dessus duquel le soleil culmine à midi reste fixe. Maintenant oui, nous avons en mains quelque chose de stable, une direction fixe, immuable dans le cours des jours et des années : ce point très lointain à l'horizon sur lequel le soleil se trouve à la moitié de son parcours diurne.

Le récit de ces expériences élémentaires contient une grande quantité d'informations, non seulement astronomiques, mais comporte le noyau de nombre d'observations faites durant les périodes préhistoriques. Elles nous permettent de saisir les motivations et la mentalité des astronomes les plus archaïques. On pourrait en fait décider, et avec de bonnes raisons, de marquer de manière permanente la direction du midi. Elle pourrait être utile aussi à d'autres parce qu'elle remplirait en même temps une double fonction : une de type *spatial*, parce que la direction du midi est un acte privilégié que seul un bouleversement cosmique peut altérer (par exemple elle pourrait servir à indiquer la route vers d'autres villages). La seconde fonction qu'elle pourrait remplir serait au contraire de type *temporel* : si nous savons tous quand il est midi, nous pouvons nous donner un rendez-vous et tout le village peut se réunir à un moment fixé et facilement identifiable par tous. Mais comment trouver toujours et facilement l'axe de midi ? On pourrait, par exemple fixer sur le terrain deux piquets de bois à une certaine distance de manière à ce que leur alignement indique avec précision la direction du midi, soit le point cardinal Sud. Plaçons donc deux piquets et invitons tout les voisins à admirer cette merveille technologique, les « deux piquets qui indiquent le midi ». Pendant quelques années les piquets remplissent leur fonction en indiquant le moment à mi-journée, mais ensuite à cause des intempéries, le bois commence à se détériorer et nous décidons de les substituer par d'énormes pierres de formes allongées réalisées dans ce but et bien enfoncées dans la terre.

Sans même s'en apercevoir, nous avons donné naissance à la civilisation des mégalithes. Nous pourrions penser que la réalisation des imposants complexes de pierres astronomiquement alignées réponde à qui sait quelles obscures croyances chamaniques, complètement étrangères à notre culture, mais les choses vraisemblablement ne se passent pas de cette manière. L'immense effort pour transporter pendant des centaines de kilomètres même répond plutôt à des exigences qui, du moins dans l'esprit initial, correspondent à des exigences de calendrier, indispensables pour connaître le moment des semences et des récoltes.

## 2 | Le phénomène des mégalithes

Un mégalithe, du grec *megas* (grand) et *lithos* (pierre) est une structure construite avec une ou plusieurs grosses pierres sans utiliser ni ciment ni chaux. Les mégalithes présentent des formes et des structures variées, même si on peut identifier plusieurs typologies fondamentales, comme *le menhir*, une grosse pierre brute ou à peine dégrossie ou *le dolmen*, un type de tombe préhistorique à chambre unique dont la construction est située entre la fin du Ve millénaire av. J.-C. à la fin du 1er millénaire av. J.-C.

En Europe occidentale les mégalithes sont habituellement ramenés à la période néolithique ou à l'âge de bronze (4500-5000 av. J.-C.). Le mégalithe le plus connu est sans doute Stonehenge en Angleterre, dont le premier groupe remonte à 3100 av. J.-C. Tous les ensembles de mégalithes n'ont pas bien sûr une signification astronomique, où par « signification astronomique » nous devons comprendre un système d'alignements de pierres qui indiquent des directions astronomiquement significatives, par exemple la direction de l'horizon où le soleil se lève au solstice d'été.

### **La guerre du feu (film, 1981) (*Quest for fire*, en anglais)**

La guerre du feu est un film franco-canadien réalisé par Jean-Jacques Annaud. L'histoire se déroule en Europe au Paléolithique, il y a 80000 ans pendant l'Ere Glacière quand des membres *Homo Erectus* de la tribu Wagabou attaquent les Oulams qui sont de l'espèce des *Homo Néandertalensis*. La promotion du film déclara qu'aucune des situations, ni aucun des choix de la mise en scène n'étaient contraires aux connaissances scientifiques de l'époque. Cependant de nombreux points sont en désaccord, quelquefois profond avec les données disponibles au moment de la réalisation du film. Il reste néanmoins un cadre général très suggestif. La langue parlée par les Sapiens a été inventée par le linguiste Anthony Burgess et constitue une des meilleures attractions du film.

### **Homo sapiens (documentaire 2005)**

*Homo sapiens* est un film documentaire de Jacques Malaterre sur l'époque des premiers hommes sur la terre. Il raconte l'histoire de nos ancêtres depuis 250000 ans. Il a été retransmis pour la première fois sur France 3 en 2006

Parmi les ensembles à signification astronomique nous pouvons mentionner :

\* **Nabta**, en Egypte dans le désert de Nubie (à environ 800 km au sud du Caire) remontant au Ve millénaire av. J.-C. Les études suggèrent qu'il aurait pu être un calendrier préhistorique qui indique le solstice d'été. Etant situé sur le Tropique du Cancer le soleil, au solstice ne projette pas d'ombres.

\***Stonehenge**, en Angleterre, réalisé par phases successives entre 3100 av. J.-C. et 1600 av. J.-C.

\* **Carnac** en France dans le village homonyme de Bretagne. Il s'agit d'un ensemble de 3000 pierres dressées par une population pré-celtique autour de 3300 av. J.-C. mais plusieurs pierres semblent remonter à 4500 av. J.-C.

**Le cercle de Goseck**, en Saxe-Anhalt (Allemagne) Il s'agit d'un ensemble de fossés concentriques de 75 mètres et deux palissades. Au solstice d'hiver, un observateur placé au centre du site voyait le soleil se lever et se coucher à travers les portes du sud-est et sud-ouest. Des fragments de céramique trouvés in situ ont permis de dater l'observatoire à 4900 av. J.-C.

Ill. 1.2 Stonehenge (Wikimedia Commons ;user Mavratti)

Ill. 1.3 : Carte de la distribution des mégalithes en Europe. (Wikimedia Commons : User TharkunComm)

L'astronomie néolithique aurait développé son activité non seulement en président à l'activité agricole mais aussi à des fins culturelles comme le culte des morts ou de la nature. On peut supposer que soit liée à ces sites de mégalithes une signification socio-culturelle plus profonde, étroitement dépendante d'une conception cosmologique qui, avec le passage du temps, se transforme également avec les changements de systèmes de transmission de la connaissance au fur et à mesure plus efficaces. Ceux-ci peuvent être identifiés dans le long passage, pas entièrement connu, du langage symbolique à celui écrit et à la mathématique.

Dans le contexte de ces méthodes précédent l'écriture et le calcul, on peut prendre en compte le Quipu. Il s'agit d'un instrument de support de la mémoire, adopté par les Incas et les civilisations pré-Andines. Un Quipu consiste habituellement en un ensemble de cordelettes de coton, colorées et nouées à plusieurs endroits qui expriment des valeurs numériques, et d'autres types. Un nombre est représenté comme une séquence de nœuds en base 10. Plusieurs données ne sont pas des nombres. Elles sont composées de chiffres, mais le nombre résultant semble être utilisé comme un code, comme l'usage que nous avons aujourd'hui d'un code postal pour envoyer la correspondance, ou d'une numérotation de rue. Gary Hurton et Carrie J. Brezine, dans un article sur Science de 2005 (1) ont indiqué qu'ils avaient identifié pour la première fois dans un quipu un concept non numérique, un toponyme de la ville de Puruchuco, (près de Lima), représenté par trois nœuds en forme de huit au début du quipu.

Le phénomène des sites mégalithiques peut donc être compris comme une étape du long processus qui a conduit à l'invention de l'écriture et de la mathématique. Une sorte de laboratoire pour exercer et encadrer la pensée abstraite, en la conduisant du mythe et du culte des forces de la nature à l'observation rationnelle de la réalité pour arriver à la prévision des phénomènes astronomiques. Dans une société pré-littérale, c'est à dire précédent l'invention de l'écriture, on devait assurer la transmission d'un savoir toujours plus complexe, non seulement grâce à la communication orale, comme on avait toujours fait, mais il fallait de nouveaux systèmes pour conserver pour la postérité le patrimoine culturel. Evidemment la pierre était le moyen le plus efficace auquel confier la conservation de la connaissance. Les sites mégalithiques et leurs alignements

astronomiques seraient donc les « bibliothèques », si vous préférez les hard disks, les disques durs, de ceux qui n'avaient pas encore inventé l'écriture.

Il y a une dernière question que l'on peut soulever face aux remarquables résultats obtenus par les civilisations les plus anciennes. Il s'agit, à vrai dire, de sujets qui parlent plus de nous et de la mentalité contemporaine que des populations antiques. On pourrait poser la question en termes suivants : Pourquoi est-il si difficile pour la culture populaire de croire que une civilisation antique ait pu obtenir de pareils résultats ? Pour quelles raisons ont tant de succès des thèses pseudo-historiques qui soutiennent que des œuvres telles que Stonehenge ou les grandes pyramides de Giseh, ou les lignes de Nazca ont dû être réalisées à l'aide d'extra-terrestres ? Ou que les constructeurs devaient de même nécessairement posséder un corpus de connaissances occultes qui nous est désormais inaccessible ? Pourquoi, par analogie, trouvent place sur les médias des thèses de « complots » qui nient qu'il y a eu un atterrissage sur la Lune et que le programme Apollo n'a été que de la poudre aux yeux ?

Ill. 1 . 4. Cercle de Goseck, Allemagne. Vue à l'intérieur de la palissade.  
(Wikimedia Commons, user Pictdayelise)

Evidemment ce sont tous des aspects d'une même question, presque les symptômes d'une maladie, qui d'un côté est une méfiance essentielle envers les capacités humaines, d'un autre côté, c'est une poussée, que n'a jamais vraiment abandonnée la culture occidentale, vers la pensée magique et initiatique. Un phénomène karstique qui émerge continuellement probablement comme une sorte de mastic à bon marché qui remplit le vide laissé par les interstices de l'ignorance.. Evidemment est latente dans notre société une mentalité diffuse d'hermétisme et de gnosticisme.. L'hermétisme est un terme utilisé pour indiquer un ensemble de doctrines mystico-religieuses et philosophiques où ont conflué durant l'hellénisme tardif des théories astrologiques, des éléments de philosophie d'inspiration platonique et pythagoricienne, des croyances gnostiques et des procédés de magie égyptienne. Le terme tire son origine de Hermès Trismégiste, c'est à dire : « Hermès le trois fois très grand ».

Ces doctrines ont eu un grand succès au moment de la Renaissance, mais, évidemment, elles sont plus que jamais présentes, même dans des milieux au-dessus de tous soupçons.

Ill. 1. 5. Les quipus étaient des instruments de support pour la mémoire utilisés par les Incas et étaient formés de cordes de coton colorées nouées à plusieurs endroits. Les nœuds expriment des valeurs numériques. (De la 4<sup>e</sup> édition de Meyers Konversationslexikon, 1880) Wikimedia Commons, user Dynamax)

### **3 | Le mouvement diurne du soleil**

Revenons au pré et observons à nouveau le mouvement du soleil. Si on se trouve à 45° de latitude Nord, qui est la latitude de Milan, au cours d'une année nous noterons que le point du lever du soleil à l'horizon oriental se déplace jour après jour. C'est exactement l'observation dont on parlait avant.

Il existe donc deux positions extrêmes rejointes par le soleil au cours d'une année : celle du jour du solstice d'hiver (21 décembre) où le soleil se lève tard et très décalé vers le point cardinal sud, et celle du solstice d'été (21 juin) quand le soleil se lève tôt très décalé vers le nord et accomplit le plus grand arc diurne de toute l'année. La longueur de la nuit est au contraire à l'inverse de celle du jour ; la nuit la plus longue est au solstice d'hiver tandis que la plus courte est au solstice d'été.

Ill. 1.6 Arc diurne du soleil aux deux solstices observés à l'équateur (Wikimedia Commons ; user Tau'olunga)

C'est seulement aux jours d'équinoxe que le soleil se lève exactement au point cardinal est et se couche 12 heures après au point cardinal ouest. Donc le 20 mars, à l'équinoxe de printemps et au 23 septembre, équinoxe d'automne, le jour a la même durée que la nuit dans tous les lieux de notre planète.

L'observation des mouvements du soleil cependant varie selon la latitude où nous nous trouvons. A l'équateur les parcours du soleil aux deux solstices se déroulent selon la figure 1.6

Alors que la situation au pôle est telle que le soleil se trouve au solstice d'été 23.40° *sur* l'horizon et au solstice d'hiver 23.44° *sous* l'horizon. En même temps les mois d'été, le soleil se déplacera parallèlement à l'horizon et ne se couchera jamais. On aura ainsi le phénomène du « soleil de minuit » (figure 1.7)

Ill. 1.7 Arc diurne du soleil observé au pôle (Wikimedia Commons ; user Tau'olunga)

#### 4 | Le terme nord

Durant la période des invasions barbares (*Migration Period* dans l'historiographie de langue anglaise, et *Völkerwanderung* dans celle de langue allemande) c'est à dire approximativement entre 300 av. J.C et 700 av. J.C les noms des directions cardinales latines *borealis* (ou *septentrionalis*) pour le nord, *australis* (ou *meridionalis*) pour le sud, *occidentalis* pour l'ouest et *orientalis* pour l'est ont été substitués par les termes actuels d'origine germanique.

Quand nous identifions les points cardinaux, nous disons que nous sommes « orientés », littéralement « *se tourner vers l'orient* ». Ce mot conserve évidemment la [interlignes] mémoire d'un procédé archaïque selon lequel, trouver l'orientation, signifie trouver la direction du lever du soleil. Si nous faisons de cette manière et nous nous tournons vers l'orient, alors durant le cours de la journée, le

soleil sera à notre droite au-dessus de la partie méridionale de l'horizon, après quoi arrivé à l'occident, c'est-à-dire dans notre dos, il se couchera. A partir de ce moment-là le soleil reste sous l'horizon et se déplace sous l'horizon nord, qui est à notre gauche, pour ensuite se lever à l'orient.

Tout ceci est très significatif. En fait le mot « nord » est exactement le terme de l'ancien haut allemand (*Althochdeutsch*) qui est la forme écrite la plus ancienne de l'allemand connue (entre 750-1050 ap. J.-C.) qui descend d'une racine pré-indo-européenne « *ner* » qui signifie soit « *gauche* » soit « *sous* » [2] Ce qui est une description correcte de tout ce qu'on observe ; en fait le soleil au nord est soit à gauche d'où sort le soleil, soit sous l'horizon. On explique ainsi pourquoi la notion de « gauche » et de « droite » sont substantiellement antithétiques, la gauche étant assimilée à un concept négatif. On pense au mot « gauche » : comme substantif en italien, il est synonyme de « incident » ou « accident », alors que comme adjectif il a le sens de « contraire », « de mauvaise augure », « néfaste ». Ce n'est pas pour rien que lorsque nous voyons un film d'horreur et que nous entendons une porte qui grince, nous disons justement que c'est un bruit *sinistre*.

Nous retrouvons d'importantes traces de cette étymologie Pré-indo-européenne dans les langues celtiques. Même actuellement dans les langues de dérivation celtique les mots qui indiquent le nord sont les mêmes qui indiquent le côté gauche et vice-versa en ce qui concerne le sud. Pour l'essentiel, le ciel est divisé dans la mythologie celtique en deux régions : la moitié claire du ciel réservée aux vivants et éclairée par le soleil au sud, et celle obscure au nord, c'est-à-dire à gauche et dessous, où est placé, selon les textes irlandais, le *Sidhe*, c'est-à-dire le règne des morts, des héros, des êtres mythiques et des dieux. Les populations celtes tenaient en outre en grande considération le mouvement du soleil et des astres ; au cours des cérémonies, ils effectuaient des déplacements de gauche à droite, c'est-à-dire selon le mouvement de la sphère céleste. Cette habitude s'est conservée dans le déroulement des processions durant les fêtes chrétiennes, dans les pays de forte tradition celtique, comme par exemple en Bretagne.[3]

### **Trois hommes et une ourse (pour ne pas parler du chien)**

Les sept étoiles du « Grand Chariot » qui constituent la partie centrale de la constellation de la Grande Ourse, sont sans doute les étoiles les plus connues du ciel boréal. Elles sont à l'origine du mot *septentrion* qui dérive du latin *Septem* (sept) et *Triones* (bœufs de travail). Et pourtant en dépit de cette popularité, c'est seulement récemment que nous avons commencé à lever le voile sur le mystère de l'origine de cette figure dans le ciel et à en déchiffrer le message complexe, caché depuis toujours. Les premières sociétés humaines de toute l'Eurasie connaissaient soit les étoiles soit le mythe de la Grande Ourse et selon la version la plus répandue, l'Ourse était désignée par les quatre étoiles du quadrilatère du Grand Chariot et était suivie par les trois étoiles de l'actuelle « queue » qui représentaient trois chasseurs. Le sujet mythologique de cette « chasse cosmique » est particulier à l'Eurasie septentrionale et centrale et aux Amériques, mais semble absent dans les autres régions du monde. Les versions eurasiatiques montrent des parallèles avec des traditions nord-américaines au niveau de détails secondaires, et ceux-ci ne peuvent être expliqués que par le lien historique d'une origine commune. Dans ce

mythe les trois chasseurs(les étoiles de la queue de l'Ourse) poursuivent un animal, qui est un élan dans la plupart des versions eurasiatiques, ou un ours dans la majorité des récits des indigènes américains. La faible étoile Alcor, très proche de Mizar, c'est à dire de l'étoile centrale de la queue, représente un chien ou une marmite. Ce mythe relie les sibériens, surtout ceux d'occident avec l'Ouest nord-américain (Salish, les Chinook) et à l'est (surtout les Iroquois). Comment se fait-il que ce mythe soit un patrimoine des Grecs, des Basques, de nombreuses tribus sibériennes et de manière surprenante, soit répandu en Amérique du Nord ? Il y a environ 14000 ans les chasseurs cueilleurs du paléolithique furent à l'origine de la première migration de la Sibérie vers le continent américain durant la dernière ère glaciaire emportant avec eux dans ces nouvelles terres le récit de l'Ourse et des trois chasseurs...et le chien(ou une marmite). Il s'agit cependant d'une datation qui marque seulement une limite supérieure ; la vraie origine de la constellation de la Grande Ourse pourrait remonter à bien avant cette migration. En fait plusieurs peintures rupestres, des objets et des crânes d'ours retrouvés dans les cavernes d'Europe d'il y plus de 30000 ans, dénotent une sorte de culte paléolithique de l'ours

Il y a de grandes chances que la Grande Ourse soit la plus ancienne et persistante création culturelle de l'humanité.

Ill 1.8 Grande Ourse tirée de l'Uranographie de Johannes Hevelius (1690)  
(Wikimedia Commons ; user Wikibob)

## **5 l'Terre plate (mais que fait le soleil la nuit ?)**

Continuons nos observations sur le pré. Suivons le soleil jusqu'à son coucher. Tout devient sombre. Mais la nuit, où va le soleil ? La question peut être plus intéressante qu'il n'y paraît, bien qu'elle ne soit posée aujourd'hui que par des enfants d'âge préscolaire. On peut affirmer que le soleil est sous l'horizon et ceci est suggéré par le fait que nous le voyons progressivement disparaître quand il le rejoint à l'occident. Mais ceci implique que l'extension de la superficie que nous piétons soit plus petite que la région où se meut le soleil, c'est à dire que la terre soit « contenue » par le ciel. Cependant cette conception n'est en rien sûre et évidente.. Nous n'avons aucun moyen de savoir quelle est la grandeur de la terre simplement en regardant autour de l'endroit où nous nous trouvons. Elle pourrait être suffisamment grande pour faire en sorte que le soleil « s'appuie » à l'endroit de l'horizon où il se couche et donc qu'il n'aille pas du tout « dessous »

### **Proto-Indo-Européen**

Ce mot est utilisé en linguistique comparative pour indiquer la proto-langue préhistorique dont on pense qu'elle est à l'origine de la plupart des langues anciennes et modernes répandues pour une large part en Europe, Iran, Inde et quelques régions d'Anatolie, d'Asie centrale jusqu'aux frontières de la Chine

occidentale. L'existence d'un tel langage est acceptée par les linguistes depuis plus d'un siècle et il y eut de nombreuses tentatives de reconstruction. Il reste cependant des désaccords et des incertitudes. L'unique chose connue avec certitude est que la proto-langue a dû se différencier en dialectes, séparés entre eux à la fin du 3<sup>e</sup> millénaire av. J.-C. Une théorie qui a un grand crédit est l'hypothèse kourgan formulée dans les années 50 par Marija Gimbutas, une variante moderne de la théorie traditionnelle de l'invasion. Selon cette théorie les Indo-Européens seraient une tribu nomade de la steppe Ponto-Caspienne (maintenant Ukraine orientale et Russie méridionale) qui se serait répandue en différentes vagues durant le 3<sup>e</sup> millénaire av. J.-C. Leur expansion coïncide avec la domestication du cheval.

Ill. 1.9 Carte des migrations indo-européennes de 4000 à 1000 av. J.-C. selon l'hypothèse Kurgan. L'aire magenta correspond à la région de Urheimat, c'est à dire la patrie d'origine des locuteurs indo-européens. L'aire rouge correspond à la zone habitée jusqu'à 2500 av. J.-C. et la région orange à la région peuplée depuis 1000 av. J.-C. (Wikimedia Commons ; user Dbachmann)

Parmi les langues dérivées du Proto-Indo-Européen, on inclut celles d'Anatolie, des Hittites, des Hellènes et des Mycéniens, les langues indo-iraniennes, le latin, les langues celtiques, les germaniques, l'Arménien, les langues slaves, l'Albanais, les langues baltes, la langue vénétique parlée par les anciens Vénètes, le Massapique dans les Pouilles, l'ancien ligure et nombre d'autres langues mortes pas toutes complètement déchiffrées. Environ trois milliards de personnes parlent actuellement des langues du groupe indo-européen.

Ill. 1.10 le dieu égyptien Rê sur la barque du Soleil durant la nuit. Rê voyage sur la barque du Soleil avec d'autres divinités, parmi lesquelles Seth et Mehen qui défendent le Soleil des monstres d'outre-tombe et Mâat qui guide la barque. Parmi les monstres il y a Apep, un énorme serpent, image de l'obscurité et des forces du chaos qui essaie chaque nuit d'arrêter le voyage du Soleil (Wikimedia Commons, user Ausir).

C'est substantiellement l'idée qu'avaient les Babyloniens, les Egyptiens et les Grecs archaïques : une fois rejoint l'horizon, le soleil arrive à un fleuve et avec une barque il est transporté durant la nuit jusqu'au point de son lever à l'orient.

Durant la période plus archaïque qui émerge de la protohistoire (l'âge précédent immédiatement l'invention de l'écriture), la transmission du savoir par le mythe a une grande importance. Le mythe, à proprement parler, n'est rien d'autre que la parole, la plus riche source d'informations de l'histoire humaine ; il peut être considéré comme un récit sacré qui dévoile des mystères et donne une réponse à beaucoup d'interrogations des hommes : comment sont nés l'univers et l'homme, l'origine des astres et de la terre, des plantes et des animaux, comment se sont formées les sociétés civiles avec l'aide des héros et des dieux. L'homme primitif ne connaît pas les lois qui gouvernent la nature, les causes de la vie et de la mort, du bien et du mal, il ne comprend pas les causes historiques qui ont déterminé la condition de son peuple devant cet univers d'images désordonnées, le mythe devient donc un moyen pour ordonner et connaître sa propre réalité

L'espace et le temps ont une réalité étrangère à la réalité. Quelques lieux sacrés interrompent l'espace profane, ce sont ces espaces que les mythes ont identifiés comme étant différents, où il faut se comporter de manière différente comme près d'une source, sur une montagne, dans un bosquet. Le temps dans le mythe est pareil à celui des fables qui commence par « Il était une fois », de même les mythes commencent par « A l'origine » ou alors ils ont un caractère cyclique : une fois arrivé l'événement, celui-ci se répète toujours, au printemps, par exemple, dans les mythes qui concernent la renaissance de la nature. Ce sont exactement ces paramètres qui rendent compte des mythes représentés par les constellations. Andromède, l'archétype de la femme parfaite ; Hercule le héros invincible qui doit surmonter une série d'épreuves ; le bateau Argos et son équipage, qui sont encore aujourd'hui bien présents dans la littérature et le cinéma, topos de la mission impossible, ou des « douze salopards ». Evidemment les détails changent, mais ces images ont une emprise très forte sur nous, et chaque fois qu'un personnage, un événement réel sont transposés au cinéma ils sont « dramatisés », recourant justement aux propres caractéristiques des mythes les plus archaïques.

Le protagoniste de cette période c'est l'aède, chanteur professionnel dans la civilisation grecque archaïque. C'était une figure sacrée, une sorte de prophète, traditionnellement aveugle et en tant que tel, rien ni personne ne le distrairait et il pouvait en aiguisant la capacité de ses sens, entrer en contact directement avec la divinité. La sagesse qu'il possédait rendait superflue la capacité de voir, c'était un ' possédé ', un inspiré et les Muses parlaient à travers lui. Il y a aussi des traces de ce comportement dans l'invocation conventionnelle aux Muses dans le proème des œuvres littéraires. Au niveau de l'originalité le rhapsode avait une position mineure car, à la différence de l'aède, il répétait simplement ce que lui avaient transmis les générations précédentes. Orphée, le chanteur dont la lyre a été placée au ciel par les Muses dans la constellation du même nom, sera toujours rappelé par sa tentative désespérée de ramener à la vie sa bien aimée Eurydice lors de son voyage dans l'Hadès, dense de significations d'archétypes.

Les œuvres d'Homère, l'Iliade et l'Odyssée (IX<sup>e</sup> - VIII<sup>e</sup> siècle av. J.-C.), comme d'autre part les œuvres d'Hésiode (VIII<sup>e</sup>-VII<sup>e</sup> siècle av. J.-C.) dérivent très probablement de cette épopée transmise par voie orale.. Dans la tradition narrative orale, les textes ne sont pas transmis de façon exacte et toujours pareils à eux-mêmes, mais ils passent d'une génération à l'autre grâce aux aèdes. C'est seulement à une époque plus tardive que ces œuvres seront mises par écrit. Dans la Théogonie d'Hésiode, probablement écrite autour de 700 av. J.-C., on raconte l'histoire et la généalogie des dieux en re-parcourant en 1022 hexamètres les événements mythologiques depuis le chaos initial jusqu'au moment où Zeus devient roi des dieux. L'importance de cette œuvre tient à son hérité. Hésiode laisse à l'activité spéculative des époques successives l'idée de la recherche d'un principe originaire du Tout, avec celui de son caractère unitaire et organique. Les poèmes homériques aussi ne se limitent pas à décrire les manifestations complexes de la réalité, mais essaient de retrouver derrière leur apparent désordre une vision cohérente avec causes et effets

Ce sera justement cette attitude de l'épopée archaïque envers la réalité qui fournira le substrat conceptuel à partir duquel feront leurs premiers pas les penseurs de l'école de Milet (VI<sup>e</sup> siècle av. J.-C.). Thalès, Anaximandre et Anaximène, les

principaux exposants de cette première tradition philosophique, furent les premiers à enquêter dans l'histoire de la pensée occidentale, sur le problème de l'archè, c'est à dire sur le principe d'origine qui préside à la genèse et à la réalité de tout ce qui existe.

Les penseurs de Milet choisirent comme principe premier, auquel reconduire l'apparente multiplicité de la réalité pour la première fois dans l'histoire, les éléments de la nature.

## 6 | La terre sphérique

Au cours du VI<sup>e</sup> siècle av. J.-C. il y eut donc une révolution conceptuelle significative. Ce fut l'œuvre d'Anaximandre de Milet (610 – ca. 546 av. J.-C.), qui autant que nous le sachions, fut le premier à concevoir l'idée que sous nos pieds, au-delà de la terre, il pouvait exister un autre ciel. Il croyait que la terre avait la forme d'un cylindre et était suspendue dans l'espace, avec deux superficies, celle habitée par nous, et celle opposée où les notions de « haut » et « bas » sont inversées. Le cylindre, c'est-à-dire la Terre devait rester stable. En outre la tradition fait remonter à lui la construction de la première méridienne, de même qu'on pense qu'il a été le premier à établir une carte de l'*Oecumene* [4 ], terme qui indiquait la portion de la terre connue et habitée par l'homme, « la maison où nous vivons tous » [5 ]. Espace et temps commencèrent ainsi à être mesurés et même représentés, disponibles pour d'autres conceptions dans l'avenir.

Imaginer l'existence d'une superficie opposée à celle où nous habitons était vraiment un remarquable saut conceptuel, quelque chose qui aura ensuite d'importantes conséquences. L'affirmation d'Anaximandre que la terre est suspendue dans le vide trouve un écho chez l'auteur anonyme du livre de Job dans la Bible. Écrit en hébreux, son noyau poétique centrale remonte au XI<sup>e</sup>- X<sup>e</sup> siècle av. J.-C., alors que la forme actuelle est attribuée à la période après l'exil du VI<sup>e</sup>- Ve siècle av. J.-C. donc après Anaximandre.

« Il étend le septentrion sous le vent, Tient la terre suspendue sur le néant » - Job 26,7

### Comment savons-nous que la Terre est sphérique ?

Il ne fallut pas longtemps pour que grâce à des réflexions successives se généralise cette nouvelle conception de « haut » et de « bas » et qu'on arrive à la conception d'une terre sphérique. Le premier à soutenir l'idée d'une terre sphérique semble être Parménide d'Elée. Selon Diogène Laerte dans les *Vitae philosophorum*, qui tire l'information de Théophraste (371 - 287 av. J.-C.) Parménide a affirmé que « la Terre est sphérique et occupe le centre de l'univers ». Il aurait été aussi le premier à affirmer que Hespérus et Lucifer sont le même astre : la planète Vénus. En outre il a compris que la Lune est toujours sphérique, reconnaissant que ses phases sont dues au changement des positions réciproques de la Lune, du Soleil et de la Terre qui détermine l'extension de la partie éclairée par le Soleil et tournée vers la Terre :

« Lumière resplendissante la nuit d'une splendeur non sienne et qui erre autour de la terre

Toujours regardant vers les rayons du soleil »

- Parménide, Fragments, 14-15 [4]

Selon le philosophe Karl Popper (1902-1994) la découverte de la part de Parménide que la Lune, au-delà de son apparente variabilité, reste dans son intégrité, constituerait un pas important vers la construction de l'astronomie scientifique[6]. Cette dernière affirmation est vraiment déconcertante. Réfléchissons un instant sur son sens et sa portée. Nous disons, avec Popper, que l'observation que la Lune reçoit les rayons du Soleil est une véritable découverte scientifique, une affirmation qui ne se trouve nulle part ailleurs avant Parménide. Cela paraît incroyable, mais la notion que ce soit le Soleil qui éclaire la Lune n'appartient pas du tout au bagage de nos connaissances intuitives et à notre sens commun. D'après ce qu'on sait, elle n'apparaît ni dans la tradition, ni dans la mythologie d'aucune population au monde.

## **7 | Comment savons-nous que la Terre est sphérique ?**

Il existe de simples observations faciles à faire qui démontrent que la Terre est sphérique. Ce sont des arguments traditionnels qui ont été adoptés aussi bien dans l'antiquité qu'au moyen âge.

### **Eclipses de Lune**

Durant une éclipse de Lune la Terre s'interpose entre le Soleil et la Lune et projette donc son ombre sur cette dernière. D'abord nous observons que la Lune s'obscurcit quand elle entre dans la pénombre et au fur et à mesure nous la voyons disparaître par degrés dans l'ombre proprement dite.

Ill. 1.11 :Eclipse de Lune du 4 mars 2007 photographiée à Gähwil (CH). Remarquer la courbure de l'ombre de la Terre sur le disque lunaire. (Wikimedia Commons ; user Knuwu)

L'observation de ce phénomène montre que le contour de l'ombre de la Terre sur la Lune est toujours courbe. Sur la base de ce raisonnement Aristote (384 – 322 av. C), dans *De Caelo*, (297b31-298a10) conclut que la forme de la Terre doit nécessairement être sphérique parce que si, au contraire, elle était un disque, elle projetterait une ombre elliptique dans toutes les directions à l'exception d'une seule où on la verrait sphérique [7].

### **Déplacement sur la latitude**

En faisant de longs voyages vers le nord ou vers le sud, on observe diverses étoiles. En particulier en voyageant vers le septentrion on verra des étoiles au sud qui progressivement disparaissent sous l'horizon, tandis qu'en voyageant vers le

sud, nous verrons se lever des étoiles qui étaient sous l'horizon sud. (Aristote, *De Coelo*, 297b24-31).

### Observations à l'horizon

Quand un navire est à l'horizon le bateau n'est pas visible alors qu'on observe ses parties les plus hautes comme les mâts et les voiles

Le géographe grec Strabon (63/64 av. JC.- 24 ap. J.-C.) dans son ouvrage *Geographica* rapporte que lumières élevées et zones de terres sont visibles pour les marins à des distances plus grandes qu'elles ne le seraient si elles étaient moins hautes et attribue ce fait à la courbure de la Terre.

Ces arguments montrent sans équivoque que la forme du monde habité est une sphère. Il s'agit donc d'une donnée acquise et connue par toute personne cultivée aussi bien dans l'Antiquité qu'au Moyen-Age. Même aux temps du haut-moyen-âge la notion de sphéricité de la Terre ne sera jamais complètement effacée. Les citoyens de l'Empire Romain étaient familiers de la sphère comme représentation du monde et du pouvoir de l'empereur sur ce monde. Par exemple une monnaie du IV<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. au temps de l'empereur Constantin I<sup>er</sup> le montre entrain de tenir un globe dans la main, et une monnaie du II<sup>e</sup> siècle ap. J.-C., au temps de l'empereur Hadrien, montre une divinité avec un globe sous les pieds. A l'époque chrétienne les monnaies représenteront le symbole de la royauté comme une sphère surmontée d'une croix (le *Globus cruciger*). On trouve un autre exemple dans la *Tapiserie de Bayeux* réalisée entre 1070 et 1077, qui décrit les faits relatifs à la conquête normande de l'Angleterre de 1066. Là, le Roi Harold tient justement en main un *globus cruciger*.

Si même parmi les populations les moins acculturées du moyen âge survit d'une certaine façon la notion de la sphéricité de la terre, pourquoi alors le savoir commun attribue-t-il d'une manière générale aux « anciens » l'idée de la terre plate ? Pour quel motif la tradition confère-t-elle à Christophe Colomb le mérite d'avoir le premier eu l'intuition et par la suite exploité avec audace la sphéricité de la Terre ? Evidemment nous tombons dans une de ces zones grises de notre culture ; là où, pour une foule de raisons pas faciles à reconnaître, même des personnes d'un très haut niveau intellectuel tombent dans l'erreur. Il semblerait que dans l'imaginaire collectif soient bien enracinées des légendes qui développent leur fonction idéologique. Et leur rôle est justement de donner une justification populaire au phénomène de la « redécouverte » de notions provenant du passé et désormais fossilisées, parmi lesquelles il y a sans aucun doute l'idée de la terre sphérique. En conséquence de quoi, celui qui fera la redécouverte et la réutilisation de telles notions anciennes est pris pour un précurseur génial de la science à venir.

Ill. 1-12 : Le *Globus Cruciger* est une sphère qui représente la Terre avec une croix au sommet. Ici on le voit sur une monnaie, un Sous de l'époque de Léon III de Byzance (env. 685-741) représenté avec son fils Constantin V. On trouve un autre exemple célèbre dans la *Tapiserie de Bayeux* réalisée entre 1070 et 1077, qui décrit des faits relatifs à la conquête normande de l'Angleterre de 1066. Là le Roi Harold tient un *globus cruciger* dans la main. Contrairement à une opinion

répandue, au moyen âge la notion de terre sphérique était commune. (Wikipedia Commons, user Jappalang)

## 8 | Astronomie égyptienne.

Nous avons vu que le site mégalithique de Nabta place les origines de l'astronomie égyptienne au temps préhistoriques, au Ve millénaire av. J.-C. Dans l'Égypte ancienne, l'astronomie n'a jamais atteint des niveaux particulièrement significatifs ; elle répondait tout au plus aux exigences de pratiques liées à la nécessité de disposer d'un calendrier et à l'exigence d'orienter les temples. Un obstacle certain à son développement a été l'incapacité des égyptiens de développer un système mathématique de position, la condamnant à rester à un stade primitif. La multiplication était par exemple remplacée par des doublements successifs [7]. Avec ces instruments de calcul à disposition on ne pouvait aller au delà d'une compréhension élémentaire des mouvements célestes. Parmi les applications pratiques de l'astronomie égyptienne on doit prendre en compte les observations de l'étoile Sirius qui annonçaient les inondations annuelles du Nil

Cette étoile de l'Égypte ancienne est appelée Sothis et son lever au matin de la seconde moitié de juillet sur l'horizon oriental annonçait les imminentes crues du Nil. C'est le *lever héliaque*, comme on dit, c'est à dire le lever d'une étoile déterminée juste avant le lever du soleil. Il s'agit d'un système simple, mais très efficace, pour identifier un point particulier de l'année solaire, ou des saisons.

### Sirius

Le nom Sirius dérive du grec *Seirus* c'est-à-dire « qui rend aride, qui fait faner ». Elle appartient à la constellation du Grand Chien. Au temps des grecs son lever à l'aube annonçait les jours les plus chauds de l'année, les jours « *caniculaires* » comme on dit, d'où dérive le mot *canicule*. Sirius est une étoile d'une grande luminosité intrinsèque, 26 fois celle du Soleil. En réalité c'est un système binaire où l'étoile A plus lumineuse (Sirius A) est au centre de l'orbite d'une petite étoile très dense, une naine blanche, (Sirius B) avec une période orbitale de 50 ans . Elle se trouve à 8 années lumière et elle est la septième étoile la plus proche du Soleil.

En outre pour déterminer l'heure pendant la nuit, les astronomes égyptiens choisirent dans le ciel une suite de 36 petites constellations, *les décans* qui se levaient chaque nuit à intervals réguliers, vraiment comme les nombres sur le cadran d'une horloge céleste en mouvement. Apparaît en outre la nature autochtone du système de constellations adopté en Égypte.

En ce qui concerne l'orientation des temples, en particulier des Pyramides, il faut souligner le haut degré de précision dans l'observation du ciel atteint par les constructeurs égyptiens au cours du IIIe millénaire av. J.-C. Les Pyramides de Giseh sont alignées sur l'étoile Thuban dans la constellation du Dragon qui à cause de la précession des équinoxes autour de 2800 av. J.-C. se trouvait seulement à deux degrés et demi du Pôle Céleste Nord.

## 9 | Astronomie Babylonienne

Si l'apport égyptien aux développements de l'astronomie a été très limité surtout à cause des exigences trop restreintes motivées par des applications pragmatiques, le discours change en ce qui concerne l'astronomie babylonienne. L'aspect le plus significatif de l'astronomie babylonienne consiste dans le fait qu'elle se fonde avec la tradition de l'astronomie grecque après les conquêtes d'Alexandre le Grand. Ce seront donc les astronomes grecs qui tireront les fruits des observations de la période babylonienne du Soleil de la Lune et des planètes, en les transformant en modèles mathématiques prédictifs, les premiers exemples d'astronomie scientifique. Cette période qui suit les conquêtes d'Alexandre est la période hellénistique : nous aurons l'occasion de voir comment la science hellénistique donnera des fruits extraordinaires.

Ill. 1.13 :Tablette YBC 7289 (env. 1800-1600 av. J.-C.). Illustre l'approximation babylonienne de la racine carrée de 2 dans l'application du Théorème de Pythagore à un triangle isocèle. (Yale Babylonian Collection and Wikimedia Commons ; user Bill Casselman)

Babylone, la première métropole de l'histoire humaine, a été depuis le 2<sup>e</sup> millénaire av. J.-C. la capitale d'un puissant empire. Gouvernée durant la période paléo-babylonienne (de 2000 à 1600 av. J.-C.) par la dynastie d'Hammourabi, elle fut conquise par les Hittites, et rapidement rattachée à l'empire kassite, auquel suivit une longue période de domination assyrienne. Après une période d'indépendance, elle tomba sous l'empire perse. Elle fut annexée ensuite en 331 av. J.-C. à l'empire d'Alexandre le Grand.

Les observateurs du ciel à Babylone sont considérés comme des astrologues, mais il faut comprendre ce terme dans un sens un peu différent de l'acception moderne. En réalité ils prenaient soigneusement note de tout ce qu'on observait d'insolite et l'interprétaient comme un présage, comme un signe de quelque chose que, avec le rituel opportun, on pourrait éviter. L'observation répétée de ces « signes » fut codifiée dans une collecte sous le nom de *Enuma Anu Enlil*, littéralement « Quand les dieux Anu et Enlil » IL s'agit d'une collection d'environ 70 tablettes d'argile qui prit sa forme définitive autour de 900 av. J.-C. Une sorte de liste d'environ 7000 signes que les dieux avaient envoyés dans le passé aux rois et qui concernaient des phénomènes astronomiques et météorologiques. La série fut probablement compilée dans sa forme canonique durant la période kassite (1651-1157), mais il y eut certainement quelque version de l'*Enuma* durant la période de l'Ancienne Babylone (1950-1651 av. J.-C.) Son emploi dura durant le 1<sup>er</sup> millénaire av. J.-C. et la dernière copie datable remonte à 194 av. J.-C. [7]

Autour du Ve siècle av. J.-C., les astronomes babyloniens se rendirent compte que 19 années solaires sont très proches des 235 mois lunaires, c'est ce qu'on appelle le *cycle de Méton* qui permet de perfectionner remarquablement le calendrier luni-solaire, c'est à dire ce type particulier de calendrier qui essaie de concilier le mois lunaire avec les saisons. Ceci fut possible parce que, à partir du VIII<sup>e</sup> av. J.-C. les scribes de l'*Enuma* commencèrent à observer et enregistrer des

phénomènes astronomiques dans le but d'améliorer les pronostics. Les enregistrements se poursuivirent pendant sept siècles et l'impact de ces observations sur l'histoire de l'astronomie fut incalculable. Moyennant ce travail continu et méthodique on discerna ainsi plusieurs régularités, ou cycle dans le comportement du Soleil, de la Lune et des planètes. A partir de la reconnaissance de ces régularités il fut ensuite possible de faire des prévisions sur les positions futures de ces corps célestes et naquirent ainsi les éphémérides, c'est-à-dire les tables qui facilitent ce calcul. Mais à la différence des égyptiens, les babyloniens avaient à leur disposition une arithmétique plutôt avancée et une notation numérique de position qui leur permit d'exploiter complètement les cycles révélés par leurs observations. Même la division du cercle en 360 unités a son origine dans l'astronomie babylonienne.

L'arithmétique qui est derrière les observations lunaires et solaires montre que les Babyloniens calculaient les *premières et secondes différences* des données observées et extrapolaient ou interpolaient les données. Ils tenaient donc compte non seulement des positions d'une planète mais aussi de sa vitesse qui n'est pas uniforme. Cette procédure signifiait que les données pouvaient être approchées par des fonctions polynomiales et leur permettaient de prédire les positions journalières des planètes [8] Cependant nous ne savons pas si les scribes avaient à l'esprit un schéma géométrique des mouvements de la Lune ou des planètes. Les babyloniens de la période séleucide, c'est à dire hellénistique, avaient de grandes tables des mouvements du Soleil et de la Lune qui en donnaient vitesse et positions variables. Plusieurs de celles-ci sont arrivées jusqu'à nous sous forme de tablettes avec des colonnes de nombres. Les astronomes babyloniens étaient capables de prédire la nouvelle Lune et les éclipses avec une approximation de quelques minutes. Ce qu'ils transmirent aux astronomes grecs, c'était des relations arithmétiques précises qui reliaient temps et distances angulaires. Et c'est exactement ces séries précieuses de données accumulées pendant des siècles par les babyloniens qui firent que les théories spéculatives des grecs de l'époque classique se transformèrent durant la période hellénistique suivante en modèles cosmologiques géométriques et peut-être aussi physiques.

## **Chap. 2 - Le mécanisme des mouvements planétaires**

### **1 | L'hellénisme.**

A propos de l'astronomie babylonienne, nous avons montré comment elle s'est nourrie de la tradition grecque et a contribué au développement de l'astronomie de la période hellénistique. Il est très difficile d'évaluer l'importance des résultats obtenus durant cette période, d'autant plus qu'ils constituent, ou plutôt c'est leur pâle souvenir qui va constituer le savoir en astronomie du Moyen Age

latin et islamique et permettre aux astronomes de la Renaissance de remettre une astronomie mathématique entre les mains de Copernic, Galilée et Kepler. C'est pour cela qu'il convient de situer de façon sommaire la période hellénistique.

L'hellénisme est un terme qui désigne la période historique et culturelle durant laquelle la civilisation de la Grèce classique s'est diffusée dans le monde méditerranéen, euro-asiatique et oriental, en se fondant dans les cultures avec lesquelles elle était entrée en contact. L'événement central pour l'histoire de l'hellénisme et qui en est l'origine, est l'expédition d'Alexandre le Grand (334-323 av. J.-C.) Par convention, on fait commencer l'hellénisme en 323 av. J.-C., année de la mort d'Alexandre et on le fait finir avec la conquête romaine de l'Égypte en 31 av. J.-C. Le terme hellénisme a été introduit la première fois par l'historien allemand Johan Gustav Droysen au XIX<sup>e</sup> siècle, et accepté ensuite par l'historiographie [9]. Après la mort d'Alexandre son empire se disloque et il y a une période de guerre entre ses successeurs, les *Diadoques* en grec. A la fin, se formèrent à sa place trois états principaux : L'Égypte, capitale Alexandrie (fondée par Alexandre en 331 av. J.-C.) gouvernée par la dynastie des Ptolémées ; le royaume de Séleucie, capitale Antioche, (en Syrie, Anatolie et Mésopotamie) ; l'état des Antigone en Macédoine.

Il y avait aussi d'autres royaumes plus petits comme celui de la Bactriane (actuellement en Afghanistan, Ouzbékistan, Tadjikistan) caractérisé par une civilisation syncrétique indo-grecque. La civilisation hellénistique ne vient pas seulement des grecs qui habitaient les régions qui avaient appartenu à l'empire d'Alexandre, mais y contribuèrent aussi des grecs provenant des villes autonomes de Syracuse, Marseille et Rhodes.

A partir de 212 av. J.-C. année du sac de Syracuse et du meurtre d'Archimède, les centres hellénistiques furent conquis par les romains et perdirent leur indépendance ; l'expansion de Rome se conclut en 30 av. J.-C. par l'annexion de l'Égypte ; le bassin entier de la Méditerranée fut unifié dans l'empire romain. Historiquement ce dernier événement marque la fin de la période hellénistique à laquelle succède la période impériale. Du point de vue de l'histoire des sciences, la période d'or du développement hellénistique était close déjà depuis plus d'un siècle avec la fin de l'activité scientifique à Alexandrie. Entre 145 av. J.-C. et 154 av. J.-C. il y eut en fait une sanglante persécution de la classe dirigeante grecque de la part de Ptolémée VIII (Evergète II). L'historien Polybe rapporte que l'ethnie grecque fut presque complètement décimée, mais ce qui s'est passé réellement n'est pas clair et les informations ne sont pas suffisantes pour comprendre les causes de la persécution. Après la persécution d'Evergète II en 145 ap. J.-C. la pénurie des intellectuels fut telle que, à la tête de la Bibliothèque fut placé un certain Cydas, officier des lanciers, comme nous le savons par un papyrus (P. Oxyrhyncus 1241, 2, 16. [9] Il y eut peut-être une conspiration fomentée dans les milieux de la Bibliothèque d'Alexandrie d'où s'ensuivit une répression ?

Ill. 2.1 Chrysispe, qui était cet homme ? Copie romaine du buste hellénistique de Chrysispe peut-être du II<sup>e</sup> siècle ap. J.-C., conservé au British Museum. (Wikimedia Commons ; user Sting).

Après la fin des guerres avec Rome et la pax romana qui s'ensuivit, une reprise partielle des études scientifiques, interrompues, fut possible entre le I<sup>er</sup> et le II<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. C'est l'époque de Ptolémée, de Héron, de Galien. Puis le déclin fut inéluctable, bien qu'Alexandrie restât pendant des siècles un centre d'études scientifiques. Le dernier scientifique original fut Diophante dont on ne peut même pas savoir quand il vécut : une période comprise entre le II<sup>e</sup> et le IV<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. Il faut situer le crépuscule de la science hellénistique au 4<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. Elle n'est plus originale et se limite à des compilations et des rédactions d'œuvres anciennes. Le meurtre cruel d'Hypatie, fille de Théon en 415 ap. J.-C. marque la fin de toute activité scientifique hellénistique.

Mais de notre point de vue, ce qui est plus grave c'est que ne nous sont parvenus que quelques fragments de la majeure partie des résultats obtenus par les scientifiques de la période hellénistique. Presque tous les écrits de l'époque hellénistique ont été perdus ; la civilisation qui a inventé le concept de bibliothèque, a inventé la philologie pour la reconstruction exacte du texte d'une œuvre, a été effacée. Les rares œuvres scientifiques de cette période ont été transmises par les Byzantins et les Arabes. Nombre de témoignages par exemple, parlent d'un certain Chrysippe de Soles (env. 280 – 207 av. J.-C.) comme du plus grand penseur de l'époque [9] Nous savons qu'il fut à la tête de l'école philosophique du Stoïcisme ; sa systématisation des doctrines stoïciennes, contenue dans environ 700 ouvrages, le firent le deuxième père du Stoïcisme et rendit cette école parmi les plus influentes du monde grec et romain et même pendant des siècles. Plusieurs fragments sont conservés dans des œuvres d'auteurs ultérieurs, comme Cicéron, Sénèque, Galien, Plutarque et d'autres. Il a même été l'auteur de contributions importantes dans la logique des proportions, mais il ne nous est parvenu que quelques fragments retrouvés sur des papyri carbonisés dans la Villa des Papyri à Herculaneum.

Un autre exemple : Hérophile de Chalcédoine (env. 335- 280 av. J.-C.) fut le fondateur de l'anatomie et de la physiologie scientifiques, ses œuvres, toutes perdues, sont citées par Galien qui a vécu plus de 400 ans plus tard.

Ces exemples démontrent qu'on a perdu des œuvres d'auteurs considérées comme fondamentales déjà par leurs contemporains. Nous ne pouvons donc nous faire d'illusions et penser que les meilleures œuvres de la période hellénistique sont arrivées jusqu'à nous grâce à un mécanisme automatique de sélection naturelle. L'activité qui a suivi a au contraire privilégié les compilations et œuvres écrites dans un langage plus compréhensible dans l'antiquité tardive et au moyen âge, quand le niveau des études était alors en régression sensible. Nous avons l'œuvre de Philon de Byzance sur les expérimentations de démonstrations de pneumatique, mais la partie la plus intéressante qui concernait la théorie n'est pas arrivée jusqu'à nous. Une grande partie des connaissances de l'Égypte de l'époque ptolémaïque proviennent de papyri trouvés au XX<sup>e</sup> siècle, le plus souvent par hasard, en général des feuilles mises de côté par les embaumeurs. Des autres royaumes hellénistiques, à part quelques informations de caractère militaire ou diplomatique qui nous ont été transmises par les romains, nous ne savons à peu près rien. Dans le royaume séleucide en Mésopotamie était encore en usage l'écriture cunéiforme sur des tablettes d'argile qui se sont mieux conservées que les papyri égyptiens, mais bien peu de tablettes ont été lues et publiées. Et même

quand les œuvres sont disponibles, il n'est souvent pas facile pour le chercheur d'en trouver une édition critique accessible, et pour les œuvres scientifiques, il n'existe pas de collections de classiques qui soient comparables aux collections importantes dédiées aux œuvres littéraires et philosophiques.

Donc le tableau que nous pouvons nous représenter de la science hellénistique est gravement lacunaire et quelle que soit la conclusion, il faudra prendre en compte que la majorité des œuvres ne sera plus jamais récupérable. Inévitablement nous devons faire des conjonctures raisonnables.

## **2 | La bibliothèque d'Alexandrie.**

L'exemple le plus significatif de l'intérêt des royaumes hellénistiques pour le savoir, son développement et sa conservation est sans aucun doute la Bibliothèque d'Alexandrie construite autour du III<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. pendant le règne de Ptolémée II Philadelphe. Nous n'avons pas d'informations sûres sur sa fin ; on considère que la Bibliothèque ou du moins une partie de ses collections a été détruite à diverses occasions avant ou après le I<sup>er</sup> siècle après J.-C. Ptolémée II a fourni en livres la Bibliothèque soit en achetant des livres sur tous les marchés et en les réclamant aux états avec lesquels il entretenait des rapports, soit en organisant la rédaction de plusieurs œuvres nouvelles [9, 10]. On recruta des experts qui en plus de maîtriser parfaitement leur propre langue connaissaient parfaitement le grec, on forma ainsi des équipes de traducteurs. Bien des siècles après on se souviendra de la mémorable entreprise que fut la traduction des textes iraniens attribués à Zoroastre ; il s'agissait de plus de deux millions de vers, qu'on peut comparer aux 12110 hexamètres de l'Odyssée. Le Zoroastrisme a été la religion nationale perse de la période achéménide à la période sassanide, entre 360 av. J.-C. et 750 ap. J.-C.

Particulièrement significatif est ce qu'on appelle *le fonds des navires*. Cette collection doit son nom au fait que, selon un édit du pharaon, tous les livres qui se trouvaient sur les bateaux qui faisaient halte au port d'Alexandrie devaient être laissés à la Bibliothèque en échange de copies. Au III<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. on entreprit en grec la traduction de l'Ancien Testament, écrit en hébreu, connue sous le nom de *Septuaginta* ou « Bible des Septantes », ou aussi la « LXX », utilisée encore aujourd'hui pour la rédaction des traductions modernes de la Bible. En quelques décennies la Bibliothèque arriva à contenir environ un demi million de livres, sous forme de rouleaux de papyrus. Il existait aussi dans le petit état de Pergame une importante bibliothèque, deuxième seulement après celle d'Alexandrie et en compétition avec elle pour l'achat des livres. Cela suffit à nous montrer que la recherche du savoir était une politique que les divers états nés après la conquête d'Alexandre le Grand avaient en commun.

## **3 | La mesure de la Terre d'Eratosthène**

Nous avons vu avec quels arguments on peut démontrer la sphéricité de la Terre. Sur cette base, comme le rappelle Aristote dans le *De Coelo*, plusieurs mathématiciens ont tenté de calculer la longueur de la circonférence de la Terre, mais on devrait parler plus d'estimations que de mesures. Ces tentatives remontent

au moins un siècle et demi avant Eratosthène de Cyrène (276- 194 av. J.-C.) responsable de la Bibliothèque d'Alexandrie. Aristote ne se soucie pas cependant de nous informer sur leur méthode. La première mesure des dimensions de la Terre fut effectuée par Eratosthène, personnage aux multiples intérêts, qui a fourni d'importantes contributions dans de nombreux domaines de la science, en astronomie, géographie, cartographie, poésie. Comme mathématicien il imagina ce qu'on appelle *le crible d'Eratosthène* : un simple algorithme pour trouver les nombres premiers jusqu'à un nombre entier spécifique. La mesure a été décrite par Eratosthène dans son ouvrage « *Sur la mesure de la Terre* » qui cependant n'est pas arrivé jusqu'à nous ; mais ce qui nous est parvenu, c'est un bref compte-rendu de divulgation, *Coelestia*, œuvre de Cléomède, auteur qui a vécu à une époque impossible à préciser entre le I<sup>e</sup> siècle av. J.-C. et 400 ap. J.-C. [9].

La méthode peut être résumée comme suit. C'est un jour spécial, le solstice d'été le 21 juin et les deux villes d'Alexandrie d'Egypte et Syène (l'actuel Assouan) se trouvent exactement l'une au nord de l'autre. Syène est située sur le Tropique du Cancer donc, à midi du Solstice d'été, le Soleil, à Syène, se trouve exactement au zénith, c'est-à-dire perpendiculaire sur nos têtes et ne projette aucune ombre. Au même moment, c'est-à-dire à midi, environ 800 km plus au nord se trouve la capitale Alexandrie et là, le soleil n'est pas au zénith, mais se trouve un peu plus bas, à environ 7 degrés de la perpendiculaire. Si nous connaissons la distance linéaire entre les deux villes, les jeux sont faits. Parce que vue du centre de la terre, cette distance angulaire entre les deux villes est justement de 7 degrés. Il suffit donc de poser une simple proportionnelle et d'affirmer que 7 degrés ont à voir avec les 800 km, comme 360 degrés ont à voir avec l'inconnue, ou bien la circonférence de la Terre. En résolvant le calcul, on obtient immédiatement la valeur de la circonférence de notre planète.

On se rend compte tout de suite qu'on a fait différentes hypothèses, données tacitement pour valides. Parmi celles-ci plusieurs sont fausses, mais peuvent tranquillement être considérées comme « des erreurs expérimentales », telle l'hypothèse que Syène et Alexandrie sont exactement sur le même méridien et donc que le moment de midi soit le même ; il s'agit d'une donnée qui concerne la précision du résultat mais non le concept. D'autres hypothèses au contraire, sont beaucoup plus délicates, comme par exemple, celle implicite que les dimensions de la Terre soient petites par rapport à la distance Terre-Soleil, ou en d'autres termes, que les rayons solaires soient parallèles entre eux. Qui nous assure qu'il en est ainsi ?

En réalité la méthode d'Eratosthène était plus complexe, comme en témoigne ce même Cléomède. Il s'agit d'une sorte de version de divulgation d'une entreprise qui avait laissé un notable écho.[9]

La mesure de la terre d'Eratosthène. Direction zénith d'Alexandrie. Direction du Soleil. Syène. Soleil au Zénith.

Figure 2.2. Mesure de la Terre d'Eratosthène. A midi du solstice d'été, le Soleil se trouve au zénith à Syène, alors que plus au nord, à Alexandrie, il est plus bas que la perpendiculaire d'environ 7 degrés (angle  $a$ ). Connaissant  $d$ , la distance linéaire entre les deux villes, on peut calculer la circonférence de la Terre.

Eratosthène déclare que la valeur de la circonférence de la Terre est de 252.000 stades. Pour comprendre la précision obtenue par la mesure il est nécessaire de connaître l'exacte valeur attribuée par Eratosthène à l'unité de mesure, le *stade*. Les opinions des savants sur ce sujet sont divergentes. Le *stade attique* commun avait une longueur d'environ 185 mètres, qui impliquerait une circonférence de 46.620 km c'est-à-dire trop grande et affectée d'une erreur de 16,3%. Si on admet au contraire, que Eratosthène a utilisé le *stade égyptien* de 157,5 mètres, la mesure est alors de 39.690 km avec une erreur inférieure à 1%. Les historiens se sont toujours montrés très sceptiques envers cette dernière valeur, la considérant comme trop précise pour les moyens limités dont disposait Eratosthène. C'est pourquoi on trouve un éventail d'opinions sur ce sujet qui va de la préférence pour le résultat erroné, jusqu'à admettre que le résultat précis soit correct mais grâce à une compensation fortuite des erreurs de signe contraire. Lucio Russo fait justement observer que l'unique mesure ensuite des dimensions de la Terre, ou du degré du méridien, sera faite par l'Académie des Sciences de Paris en 1669. Les français obtinrent une valeur du degré du méridien de 11,715 km, avec une erreur de 0,54% [9].

Eratosthène ne se limita pas à mesurer la circonférence de la Terre. Strabon rapporte une de ses mesures : la distance entre Alexandrie et Rhôdes de 3750 stades et les historiens l'ont à nouveau interprétée comme une estimation proche par hasard, de la valeur correcte. Et pourtant Cléomède nous informe sur un aspect de la mesure de l'ombre à proximité de Syène particulièrement éclairant à propos de l'effort fait par Eratosthène pour faire une mesure avec le maximum de précision possible. Cléomède dit en fait que, à midi du solstice d'été, les méridiennes ne faisaient pas d'ombre sur une bande large de 300 stades autour du Tropique. La conclusion que Lucio Russo tire de ce détail est que les mesures avec les méridiennes ont été nombreuses, sur une vaste zone et que le tropique a été mesuré évidemment comme la ligne médiane de la bande sans ombre. Donc Eratosthène n'aurait jamais rêvé en affirmant que Syène se trouve sur le tropique, mais elle est simplement la localité qui en est la plus proche, la base naturelle pour toute expédition sur le tropique. Le bibliothécaire d'Alexandrie savait que les différences de latitude étaient relevables par des observations astronomiques entre des localités sur le même méridien et distantes de 400 stades (Strabon, Géographie, II, i, 35). Mais Syène se trouve à plus de 400 stades du tropique. En outre le mathématicien Pappus (290-350 ap. J.-C.) dans son œuvre *Collectio*, dans le livre VII, cite une œuvre perdue d'Eratosthène dont le titre est *Sur les moyennes*. L'existence d'un traité sur ce sujet suggère que Eratosthène a possédé une technique de théorie des erreurs qui consistait à faire beaucoup de mesures à condenser dans un unique résultat par la méthode de la moyenne [9]. Si en fait, la distance entre les deux villes est erronée, cette erreur se répercutera dans le résultat final. Dans le monde romain il existe des morceaux de routes étonnamment droits, comme les 90 km de la Via Appia entre Rome et Terracina, ou les côtés de zones de territoire à l'équerre, les *centuriatio*, de plus de 50 km, qui forment des angles parfaitement droits. Cela exige des techniques de triangulation [11]. Peut-être que Eratosthène a utilisé une autre technique de mesure en se fiant aux *bématistes*, c'est-à-dire aux spécialistes qui pouvaient mesurer les distances en comptant les pas [12]. Ils avaient déjà accompagné Alexandre le Grand dans ses expéditions. Leur précision pouvait être surprenante, et peut-être employaient-ils aussi des

instruments comme les odomètres, appareils dotés de roue qui servaient à mesurer la distance d'un bout de route, bien qu'aucune source n'en parle. Des neuf mesures de bématises citées dans le *Naturalis Historia* de Pline, huit montrent une déviation de moins de 5% de la distance réelle, trois d'entre elles moins de 1%.

Il existe cependant une autre possibilité : celle de l'emploi de systèmes dotés de lentilles pour le relevé géodésique. Revenons en arrière. Nous savons très peu de choses sur l'optique dans le monde grec parce que les deux principales œuvres conservées, d'Euclide et de Ptolémée, sont séparées dans le temps par un demi millénaire environ. Il semble que le traité d'Euclide représente une phase initiale de cette science, qui se développa davantage dans les traités hellénistiques d'époque ultérieure mais qui ne nous sommes pas parvenus. L'œuvre de Ptolémée, au contraire représenterait, selon différents indices, davantage une récupération partielle des connaissances précédentes qu'un développement. Donc on ne peut pas reconstruire l'état réel atteint par la science optique durant la période hellénistique et parmi les connaissances sur lesquelles manquent des informations, prennent une place particulière celles relatives à la réfraction. La partie qui la concerne dans l'œuvre de Ptolémée nous est arrivée incomplète. Mais l'intérêt de l'application de cette discipline est évident car elle ouvre la voie à l'emploi des lentilles. Les lentilles existent-elles vraiment dans l'antiquité ? [13, 14] Dans diverses sources littéraires, il y a des témoignages d'emploi de lentilles. Pline (*Naturalis Historia*, XXXVII, 28-29) rapporte l'usage en médecine de lentilles pour cautériser des blessures. Et puis il existe des évidences archéologiques particulièrement notoires de lentilles fabriquées dans l'antiquité. En Crète on a retrouvé deux lentilles plan-convexes et l'une d'elle pouvait agrandir sept fois. Au musée d'Héraklion, on expose plus d'une vingtaine de lentilles et à Pompéi on a retrouvé des lentilles depuis la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. Cependant on les a souvent interprétées comme des bijoux et non reconnues comme des produits technologiques concernant tout au plus les fabricants de bijoux et les graveurs. Mais les sources littéraires nous disent autre chose, plus pertinente par rapport à notre intention qui est de reconstruire les méthodes qu'Eratosthène a pu utiliser pour déterminer les dimensions de la Terre. Une référence particulièrement claire est celle de Strabon. Il fait allusion à certains « tuyaux » moyennant lesquels on pourrait obtenir un agrandissement des images au moyen de la réfraction des rayons visuels (*Géographie*, III, i, 5). Un passage de Geminus, savant du 1<sup>er</sup> siècle ap. J.-C., est intéressant. Il y explique comment ceux qui était chargés du relevé et qui utilisaient les dioptrés, se basaient quelquefois sur le phénomène de la réfraction. Cet instrument, la dioptré, consistait en un système de cercles gradués avec une mire, selon une description fournie par Héron d'Alexandrie (env. 10- 70 ap. J.-C.) et était largement utilisée dans la réalisation de routes et d'aqueducs. Cela veut-il dire que Geminus rapporte l'éventualité que les dioptrés pouvaient assembler des systèmes de lentilles pour agrandir, c'est-à-dire des petites lunettes d'approche, exactement comme dans les théodolites modernes ? C'est une possibilité qui ne peut être complètement écartée surtout si on raisonne sur le sens du mot « dioptré ». Lucio Russo fait remarquer que *dioptron* étymologiquement signifie quelque chose à travers quoi passe la vue, mais la conviction dans l'antiquité que les lentilles n'existaient pas a amené souvent les savants à traduire *dioptron* par « miroir » qui cependant avait un terme spécifique : *katopton* [9]. C'est pourquoi il est bien étrange que par dioptré on entende un dispositif qui a le même nom que le mot employé pour indiquer les lentilles, et

qu'on en fasse aucun usage. Il est vrai que l'affirmation selon laquelle dans la période hellénistique il y avait des systèmes de lentilles sur les dioptrés capables donc d'augmenter la précision des relevés terrestres est difficile à accepter, mais n'oublions pas non plus, que nous avons un trou de cinq cents ans dans la connaissance de la science optique. Peut-être qu'aussi, avec l'usage d'odomètres ou de théodolites il fut possible de mesurer la distance entre Alexandrie et Syène avec une précision élevée et de là arriver à une mesure exacte de la Terre.

#### 4 | La rétrogradation des planètes

Depuis les temps les plus anciens, les astronomes notèrent comment certains astres se déplacent dans le ciel par rapport aux étoiles. Les grecs appelèrent ces astres en mouvement « » (*planetes asteres*, c'est-à-dire « étoiles errantes ») ou simplement « » (*planetoi* : « errantes ») d'où dérive le mot *planète*. Le texte le plus ancien qui réfère à une planète est une liste babylonienne d'observations des mouvements de Vénus, connue comme *la tablette d'Ammissaduqa*. Il s'agit d'une copie du VII<sup>e</sup> siècle av. J.-C. d'une suite d'observations de la planète Vénus qui remonte probablement au deuxième millénaire avant J.-C. [7]. Le mouvement des planètes par rapport aux étoiles dites pour cela aussi *étoiles fixes*, se passe le long d'une zone du ciel bien précise, *l'écliptique*. Celle-ci est rigoureusement le chemin apparent que le Soleil trace dans le ciel durant l'année et les éclipses du Soleil se passent sur elle (*ékleipsis*, précisément « abandon, manque » de *ekleipen* « abandonner, disparaître »).

Du grec « ekleipsis » dérive donc *écliptique*, l'orbite apparente parcourue en une année par le Soleil et par extension la zone où on pourra observer les planètes. Durant leur mouvement, les planètes se maintiennent proches de l'écliptique déviant parfois vers le nord et parfois vers le sud, mais toujours à l'intérieur d'une bande qui s'étend sur 8 degrés des deux côtés de l'écliptique. En termes modernes nous pouvons décrire l'écliptique comme le plan orbital des planètes du Système Solaire.

La conception cosmologique est une conception géocentrique ; la terre est une sphère au centre de l'univers et elle est statique ; à une certaine distance on trouve la sphère des étoiles fixes. Le Soleil, La Lune et les planètes connues dans l'antiquité et observables à l'œil nu, c'est-à-dire, Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne, se trouvent dans l'espace entre la surface terrestre et la sphère des étoiles fixes.

Figure 2. 3 L'écliptique est le chemin apparent du Soleil sur le fond des étoiles fixes causé par le mouvement de révolution annuel de la Terre autour du Soleil. (Wikimedia Commons ; user Tau'olunga).

Ces objets ont deux types de mouvements :

Un mouvement d'ensemble diurne, c'est-à-dire de 24 heures, autour de la Terre qui concerne Soleil, Lune, planètes et sphère des étoiles et c'est là la raison du lever et du coucher des astres ;

Un mouvement individuel et propre à chacun de ces astres. Le soleil tourne en une année autour de la Terre, la Lune en un mois environ, et les planètes ont chacune leur période.

Si on ne va pas chercher dans les détails, on peut affirmer que tous ces astres tournent autour de la Terre chacun sur une circonférence. Il s'agit cependant d'une description extrêmement simplifiée.

Imaginer que les planètes se limitent à accomplir un tour autour de la Terre ne rend compte en aucune façon des observations, du moment qu'elles présentent le phénomène de rétrogradation. La rétrogradation des mouvements planétaires consiste dans le fait que si nous, nous observons la position d'une planète sur le fond des étoiles fixes au cours des mois et des années, nous verrons, au début la planète se déplacer de l'ouest vers l'est (mouvement direct), nous la verrons ensuite s'arrêter et inverser sa direction (mouvement rétrograde). Nous observerons à nouveau un arrêt, et ensuite encore un mouvement direct. En bref une planète externe (c'est-à-dire Mars, Jupiter, Saturne) dans son mouvement sur l'écliptique dessine des « nœuds ».

Figure 2.4 Cosmologie géocentrique. (Planétarium de Milan, Auteur Mogi Vicentini, [www.mogi-vice.com](http://www.mogi-vice.com)) – Video : Modèle géocentrique <http://www.mogi-vice.com/Scaricamento/Aristotele.zip> (avi-DivX, 7Mo).

Il semble que le premier à se poser le problème des rétrogradations des planètes ait été Platon (427- 347 av. J.-C.) Selon une théorie rapportée par Simplicius (env. 490 ap. J.-C. - env. 560 ap. J.-C.), Platon pose une question aux astronomes grecs : « Partant du fait qu'il y a quelque chose qui uniformise et organise les mouvements, peuvent-ils être expliqués ? » Platon suggéra que le mouvement apparent chaotique des planètes pouvait être expliqué par la combinaison des mouvements uniformes et circulaires centrés sur la Terre.

Le défi de trouver une explication aux mouvements complexes des planètes fut relevé par un élève de Platon, Eudoxe de Cnide (408-355 av. J.-C.) dont les œuvres ont toutes été perdues ; pourtant nous avons des informations sur lui par des sources secondaires. Il semble que les contributions d'Eudoxe aient été fondamentales pour les développements futurs de la science mathématique grecque. Son modèle des mouvements planétaires était bel et bien un vrai modèle mathématique, entendant par cela qu'il fournissait des prescriptions précises exprimées en termes mathématiques, qui permettaient de faire des calculs sur les positions dans le temps des planètes. Il ne s'agissait donc pas d'une simple description qualitative convenue simplement pour expliquer le phénomène de la rétrogradation.

Figure 2.5 La rétrogradation des planètes. Mars entre juin et novembre 2003 dans la constellation du Verseau. La planète a initialement un mouvement d'ouest en est, puis s'arrête et revient en arrière (mouvement rétrograde). Enfin elle change à nouveau de direction et reprend son mouvement direct. Bref elle décrit un « nœud ». (Wikimedia Commons ; user Seav).

Dans son modèle, dit des *sphères homocentriques*, il y a diverses sphères ayant un unique centre de rotation qui coïncide avec le centre de la Terre. Sur chaque sphère il y avait une planète sujette à un mouvement circulaire uniforme différent de celui des autres. Par cet artifice, Eudoxe explique les mouvements rétrogrades et les arrêts des planètes : pour les étoiles fixes il attribua une unique sphère en rotation diurne autour de la Terre immobile, alors que pour les planètes le mouvement était expliqué par une première sphère qui induisait un mouvement diurne, une autre pour le mouvement mensuel et enfin une troisième et une quatrième avec une orientation différente des axes pour le mouvement rétrograde. En tenant compte que le Soleil et la Lune en possédaient trois, on arrive à un système complexe de 27 sphères. La limite la plus importante de ce modèle cosmologique est qu'il est inadéquat pour expliquer les variations de luminosité des planètes au cours du temps. Comme les sphères sont « homocentriques » ou centrées sur la Terre, les planètes devraient toujours se trouver à la même distance, mais s'il en était ainsi, on ne comprend pas comment on pouvait observer au contraire des variations de leur luminosité. Donc entre les évidences observées, c'est-à-dire *les apparences*, comme on disait dans le langage de la science hellénistique, il y a en plus des rétrogradations, les variations de luminosité des planètes. La réponse à ce dernier problème est donnée par Apollonios de Perga (262–190 av. J.-C.) en introduisant le modèle à épicycle et déférent. Avec *épicycle* (littéralement, « sur le cercle ») on indique une circonférence dont le centre est placé sur la circonférence d'un cercle de rayon plus grand dit *déférent*, au moins dans les premières versions de la théorie, centré sur la Terre. La variation de distances obtenue par la combinaison des mouvements de l'épicycle et du déférent, permet d'expliquer aussi bien la variation de luminosité que le mouvement apparent entre les étoiles. Le grand divulgateur du modèle à épicycle et déférent sera au II<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. Claude Ptolémée dans son œuvre la *Megale syntaxis* (Grand Traité) plus connu cependant sous son nom arabe *Almageste*, traité mathématique et astronomique qui constituera pendant environ mille ans la base des connaissances astronomiques islamiques et latines jusqu'à Copernic.

## 5 | Héliocentrisme ?

Figure 2.6 Modèle à épicycle et déférent de Apollonios de Perga.

Les deux modèles cosmologiques que nous avons considérés, les sphères homocentriques de Eudoxe et celui des épicycles et déférents de Apollonios, sont géocentriques, c'est-à-dire supposent la Terre fixe au centre de tous les mouvements. Mais nous savons qu'il existait aussi une vision héliocentrique, selon

laquelle on supposait que c'était la Terre qui tournait autour du Soleil. Ce sera ensuite Copernic qui réaffirmera ces idées au XVI<sup>e</sup> siècle.

De toute la recherche menée par les astronomes hellénistiques entre le IV<sup>e</sup> siècle av. J.-C. et le I<sup>er</sup> siècle av. J.-C., la période qui va de Eudoxe de Cnide à Hipparque (après les recherches s'interrompent), il ne reste que deux œuvres mineures. Il s'agit du travail de Aristarque de Samos (310 av. J.-C. - 230 av. J.-C.) *Sur les dimensions et les distances du Soleil et de la Lune*, et celui de Hipparque *Commentaire aux « Phénomènes » de Aratus et Eudoxe*. A ces œuvres on peut ajouter un passage d'Archimède où est décrite la théorie héliocentrique de Aristarque de Samos. Tous les autres ouvrages de Callipos, Héraclide du Pont, Conon de Samos, Archimède, Apollonios de Perga, Séleucos de Séleucie et Hipparque sont perdus. C'est pourquoi il est très hasardeux de prétendre avoir une idée correcte de ce que a été le véritable état de l'astronomie hellénistique. Nous devons à Lucio Russo la tentative la plus complète de reconstruction de la science hellénistique. Il a surtout souligné qu'il n'est pas du tout justifié de croire qu'on a sauvé les meilleures œuvres de l'antiquité. Selon ce que rapportent Archimède, Plutarque, et Simplicius, Aristarque de Samos avait développé une théorie qui attribuait à la Terre un mouvement annuel de révolution autour du Soleil et un mouvement de rotation diurne autour d'un axe incliné par rapport au plan de l'orbite. Lucio Russo cite un passage de Sénèque (4 av. J.-C. - 65 ap. J.-C.) des *Naturales quaestiones* (VII, XXXV, 5) où il affirme que les planètes dont nous observons la rétrogradation, en réalité ne peuvent pas inverser le mouvement parce que si elles le faisaient, c'est-à-dire si elles s'arrêtaient vraiment sur leur point d'inversion, elles finiraient par tomber les unes sur les autres.

Pourquoi ? Evidemment disparaîtrait l'argument de la « fronde » que nous pouvons comprendre facilement dans le cas de la Lune, comme il est rapporté par Plutarque dans le *De facie quae in orbe lunae apparet* [9]. Si la Lune s'arrêta, voilà qu'elle tomberait sur la Terre. Comment donc alors au moment de halte planétaire, une planète ne tombe pas sur la Terre ? L'explication qu'en donne Sénèque est qu'en réalité la rétrogradation est le résultat d'une combinaison de mouvements circulaires, et l'inversion même de la direction du mouvement est un leurre parce que les planètes ne changent pas du tout de direction. C'est pour cela sans doute que la source hellénistique que Sénèque cite applique aussi aux planètes l'idée d'équilibre, rapportée par Plutarque dans le cas de la Lune entre la force gravitationnelle et la force centrifuge, c'est-à-dire l'argument de la fronde. Si donc une considération de caractère dynamique conduit Sénèque (et sa source) à conclure que la rétrogradation est « un leurre » signifie que les planètes ne tournent pas autour de la Terre. C'est pourquoi Sénèque se réfère à une théorie héliocentrique qui était déjà soutenue par des considérations physiques sur le rôle de la gravité. Il est vraisemblable que cette source soit Hipparque.

Un autre auteur particulièrement connu est Séleucos de Séleucie (150-190 av. J.-C.) Lucio Russo a fait une étude approfondie sur les théories de Séleucos dans son ouvrage *Flux et Reflux* [5] A partir des études des sources littéraires qui rapportent des fragments des travaux de Séleucos, L. Russo montre comment, à partir de l'étude de plusieurs particularités des flux de marée, en particulier le cycle

annuel des différences diurnes, c'est-à-dire des différences entre les deux hautes marées de jour, observables dans la Mer d'Arabie, Séleucos aurait obtenu une justification dynamique de l'héliocentrisme.

Cette dernière affirmation demande réflexion. Elle signifie qu'un astronome du II<sup>e</sup> siècle av. J.-C. était en mesure de *démontrer* que la Terre gravite autour du Soleil. Même Newton n'aura pas un tel argument entre les mains.

## 6 | La machine d'Anticythère

Tout le monde connaissait les grands chefs-d'œuvre de l'art, de l'architecture et les œuvres des philosophes de l'Antiquité. Nous aurons du mal cependant à associer à cette époque l'idée de technologie, comprise comme un effort sciemment organisé pour atteindre des objectifs tels que des mesures minutieuses ou la construction de mécanismes complexes pour des calculs astronomiques. Nous avons considéré, autant qu'il est possible de reconstruire, les difficultés conceptuelles et pratiques que l'Égypte ptolémaïque a affrontées pour obtenir une mesure, peut-être très précise, des dimensions de la Terre [15]. Il reste des traces en plus de singulières pièces archéologiques qui nous poussent aujourd'hui à revoir beaucoup de nos lieux communs sur un désintérêt des grecs envers la technologie. Malgré la rareté des moyens, il a été possible d'obtenir des résultats d'une précision déconcertante.

### Etymologie « machine »

Le mot « machine » a la même racine que le mot « mage » et « magie ». Il dérive du Proto-indo-européen « maghana »- (ce qui rend possible) de la base « magh » (« être en mesure », avoir pouvoir »). Cette racine est à comparer soit avec le terme « mogo » (être capable de » Ancien Slave Ecclésiastique, la plus ancienne langue slave attestée, connue depuis le IX<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. et développée par les saints Cyrille et Méthode) soit avec le terme vieil anglais « maeg » (« Je le peux » d'où dérive « might ») [2]. Le vieil anglais est la plus ancienne forme connue de la langue anglaise, parlée entre le V<sup>e</sup> et le XII<sup>e</sup> siècle, dans des zones géographiques qui englobent une partie de l'Angleterre d'aujourd'hui et de l'Écosse méridionale.

Les pièces retrouvées en 1900 en Grèce à 43 mètres de profondeur par un groupe de pêcheurs d'éponges au large de la petite île rocheuse d'Anticythère représente l'instrument le plus complexe de toute l'antiquité, connu aujourd'hui comme *la machine d'Anticythère*. Les fragments ont été retrouvés à proximité de l'épave d'un énorme navire remontant au 1<sup>er</sup> siècle ap. J.-C. destiné au transport des statues de bronze et de cuivre. Jacques –Yves Cousteau explora en 1978 l'épave du bateau et ne trouva pas d'autres fragments de la machine d'Anticythère. C'est seulement vers la moitié du XX<sup>e</sup> siècle que la machine commença à révéler son importance aux chercheurs : elle fait partie d'une machine astronomique, qui révèle la subtilité d'un projet qu'on pensait impossible à atteindre à cette époque-là,

étant donné que rien de comparable n'a existé pendant le millénaire et demi qui a suivi. Il s'agit donc d'une création découlant des études d'Archimède, Hipparque et Posidonios. La machine d'Anticythère est le plus ancien calculateur mécanique connu, datable autour de 150-100 av. J.-C. Il s'agit d'un planétarium, mû par des roues dentées, qui servait à calculer la position du Soleil sur l'écliptique, les phases lunaires, les cycles des éclipses (de Méton, Saros, Callippe, Exeligmos), les dates des jeux panhelléniques, peut-être les mouvements des cinq planètes connues alors. Les fragments du mécanisme sont actuellement exposés au Musée Archéologique National d'Athènes. La machine est remarquable par son niveau de miniaturisation et par la complexité de ses parties, elle devait être actionnée par une manivelle. Elle contient 30 engrenages bien que Michael Wright, le chercheur qui a le plus étudié la machine d'Anticythère, ait réalisé une reconstruction qui fonctionne de la machine avec 72 roues dentées. Son hypothèse prévoit aussi l'existence de mécanismes capables de reproduire la rétrogradation des planètes ; il y a des références aux planètes Vénus et Mars dans les inscriptions récupérées sur la machine. Il faut dire cependant qu'aucun des engrenages relatifs aux planètes n'a été retrouvé, mais la reconstruction de Wright justifie une roue dentée qui autrement ne trouve pas sa place. Dans le cadran frontal, on trouve aussi un *parapegma*, sorte d'instruction pour l'emploi ou d'éphéméride, qui était utilisé pour noter le lever et le coucher des étoiles spécifiques.

Nous savons par des sources littéraires qu'il existait une tradition de construction de dispositifs de ce type, c'est-à-dire des calculateurs de position des planètes. Selon un témoignage de Pappus (env. 290 ap. J.-C.- 350 ap. J.-C.) Archimède dédia une œuvre, aujourd'hui perdue, *Sur la Sphère*, à la construction de planétariums et d'horloges astronomiques. Cicéron (106 av. J.-C.- 43 av. J.-C.) dans le *De Republica*, mentionne deux machines capables de prédire la position du Soleil, de la Lune et des cinq planètes connues. Ces dispositifs avaient une histoire intéressante. Construits tous les deux par Archimède, ils furent apportés à Rome par le Général Marcus Claudius Marcellus après la mort d'Archimède au siège de Syracuse en 212 av. J.-C. Marcellus avait un grand respect pour Archimède et une de ces machines a été l'unique chose qu'il conserva du siège de la ville ; l'autre a été portée en offrande au temple des Vertus. Les descendants de Marcellus gardèrent la machine comme une relique de famille. De cette machine il ne reste que quelques témoignages de romains érudits [16] qui la virent et en comprirent l'importance exceptionnelle, mais sans qu'aucun ne tente jamais d'en faire une réplique ou un dessin technique.

Nous devons conclure qu'il a existé une tradition de construction de mécanismes astronomiques remontant au moins à Archimède. Comme la totalité des études scientifiques du monde hellénistique, cette activité s'interrompt aussi durant le 1<sup>er</sup> siècle ap. J.-C. Nous pouvons seulement faire des hypothèses sur le constructeur de la machine et pourquoi elle a été construite.

Figure 2.8 Détail de la reconstruction de la machine d'Anticythère, avec des mécanismes relatifs à la planète Mars, selon Michael Wright.(Auteur Mogi Vicentini, [www.mogi-vice.com](http://www.mogi-vice.com)) Video : modèle virtuel de Mogi Vicentini selon la reconstruction de Michael Wright (avi-DivX, 320 Mo).

Il est plausible que ce soit un dispositif à but illustratif et didactique, qui avait la fonction de résumer, dans un objet grand comme une boîte de chaussures, toute la connaissance astronomique hellénistique qui confirmait les résultats obtenus par les babyloniens pendant deux millénaires d'observations. Il est remarquable que le même intervalle de temps s'est passé entre les premiers astronomes babyloniens qui effectuèrent ces observations et les constructeurs de la machine d'Anticythère, que celui qui nous sépare de ceux qui la fabriquèrent.

## 7 | Hipparque et la précession des équinoxes

De nombreux indices identifient Hipparque de Nicée (190- 120 av. J.-C.) comme la figure principale dans le panorama de l'astronomie hellénistique et plus en général de la science de cette période. Comme nous l'avons déjà rappelé, aucune de ses œuvres, au moins quatorze, ne nous est conservée, à part le commentaire sur le poème de Aratus de Soles, sauvé uniquement grâce à la popularité de ce poème.

### Parchemins et palimpsestes

Le parchemin (*membrana* en latin) prend son nom dans la ville de Pergame (en Asie Mineure) où, selon la tradition rapportée par Pline l'Ancien, il aurait été inventé autour du II<sup>e</sup> siècle av. J.-C. pour remplacer le papyrus. Pergame avait une grande bibliothèque qui rivalisait avec la fameuse Bibliothèque d'Alexandrie. Quand l'Égypte cessa d'exporter le papyrus à cause de la concurrence culturelle entre le souverain égyptien Ptolémée V et le roi de Pergame Eumène II (196-158 ap. J.-C.) Pergame répliqua en inventant le parchemin. Dans le monde antique le parchemin n'eut pas de toute façon une grande diffusion, à cause de la concurrence du papyrus, produit beaucoup plus abondant et moins coûteux. C'est seulement à partir de l'antiquité tardive (V<sup>e</sup> siècle) que la diffusion du parchemin sembla augmenter pour devenir le principal support de l'écrit durant le Moyen Âge, avant d'être définitivement remplacé par le papier. La rareté du matériau poussa d'abord au réemploi dans le haut moyen âge des plus anciens livres manuscrits abîmés où les textes étaient effacés pour pouvoir écrire à nouveau sur les pages de parchemins. Ces livres manuscrits sont appelés palimpsestes (du grec, « gratté à nouveau ») ou en latin, *codices rescripti*.

En astronomie planétaire, les vieux cratères lunaires, dont le relief a disparu à cause des éruptions volcaniques successives, laissant seulement l'ombre des bords, on les appelle eux aussi des palimpsestes. Un emploi plus moderne et commun du terme palimpseste fait référence au programme d'une chaîne de radio ou de télévision, qui sont « réécrits » périodiquement. *Le palimpseste d'Archimède* est particulièrement important ; le codex du parchemin original, où étaient écrites plusieurs œuvres d'Archimède, remonte au X<sup>e</sup> siècle. Au XIII<sup>e</sup> siècle, le parchemin fut effacé pour y réécrire un texte de prière. Lors des siècles suivants, le palimpseste fut acquis par la bibliothèque du monastère du Saint Sépulcre de Jérusalem. En 1899 Papadopoulos Ketaleus, remarqua que le palimpseste contenait

à l'origine un texte de nature mathématique, encore partiellement lisible. En se basant sur un tel témoignage en 1906, le philologue Johan Ludwig Heiberg examina le palimpseste y découvrant des œuvres d'Archimède encore lisibles. La nouvelle fit immédiatement le tour du monde suscitant la stupeur d'autant plus que Heiberg avait aussi découvert une œuvre d'Archimède inconnue : *La méthode*. Le palimpseste fut ensuite soustrait à la bibliothèque du Saint Sépulcre, finissant à Paris dans une collection privée. En 1998 le palimpseste a été vendu aux enchères chez Christie's et acquis par un anonyme américain. Depuis on a commencé un long travail de récupération du texte des œuvres d'Archimède avec l'emploi de techniques modernes de relevé aux rayons X et à la lumière de synchrotron.

Ptolémée dans l'*Almageste* rapporte deux résultats déjà suffisants pour mesurer l'importance d'Hipparque : la découverte de la précession des équinoxes, et la mesure probable de la distance de la Lune égale à 59 rayons terrestres, avec une erreur inférieure à 2%, la bonne mesure étant 60.

Figure 2-9 La Terre telle qu'elle serait vue par un observateur placé sur le Soleil. Sont visibles l'axe de rotation terrestre, l'écliptique (c'est-à-dire le plan de l'orbite terrestre) et l'équateur céleste. (Wikimedia Commons ; user Dna-webmaster).

La contribution d'Hipparque est particulièrement remarquable, selon diverses sources, en ce qui concerne l'étude de la gravité. A titre simple d'exemple on peut rappeler un passage de Plutarque dans le *De Facie*. Il écrit ceci à propos du mouvement lunaire : « Il est vrai que la lune est empêchée de tomber par le mouvement même et la rapidité de sa rotation, comme les objets posés sur les frondes sont empêchés de tomber par le mouvement circulaire ».

Le sens de ce passage du *De facie* et des parties suivantes a été analysé à fond par Lucio Russo. La citation suggère le développement d'une théorie qui unifiait l'étude des corps célestes avec le mouvement des objets sur la terre. Une synthèse donc aurait été réalisée entre astronomie et balistique. Nous savons que le principal centre d'études sur la balistique était Rhodes, où Hipparque avait travaillé dans la deuxième moitié du II<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. ; en outre Simplicius parle d'une œuvre d'Hipparque au titre très significatif à ce propos : *Sur les corps « poussés » vers le bas à cause de la gravité*.

Nous nous trouvons en face de quelque chose de complètement différent des idées aristotéliennes qui assumaient une totale séparation entre les lois du mouvement dans les ciels et les régions sublunaires. Affirmer que tous les « Anciens » pensaient en termes de physique pré-scientifique aristotélienne n'est pas vérifié par les sources littéraires ; cette image est plutôt celle que se feront les savants des époques suivantes du moyen-âge et de la renaissance, sur la base des textes qui ont survécu, qui ne permettent pas de reconstruire le niveau réel des connaissances hellénistiques. Mais Hipparque a fait des recherches dans différents domaines, avec des déductions logiques très claires. Selon ce que rapporte Strabon, l'astronome avait déduit l'existence d'un continent qui séparait l'océan Indien de

l'océan Atlantique, en se basant sur les différences entre les marées de la mer d'Arabie, étudiée par Séleucos de Séleucie, et celles observées sur les côtes atlantiques d'Espagne et de France. La conclusion d'Hipparque était qu'il pouvait y avoir une seule mer de l'Espagne à l'Arabie, mais elle devait être séparée par une terre émergée encore inconnue, c'est-à-dire le continent américain (Strabon, *Geographia*, Livre I, I.8 et I.9) [17].

La contribution grâce à laquelle on se souvient d'Hipparque est sans aucun doute la découverte de la précession des équinoxes autour de 130 av. J.-C. Il en donna une explication dans son ouvrage *Sur la rétrogradation des points solsticiaux et des équinoxiaux* ; l'œuvre est perdue mais la méthode qu'il a adoptée est décrite dans l'Almageste de Ptolémée. Hipparque mesura la longitude de l'écliptique de l'étoile Spica et des autres étoiles lumineuses durant une éclipse lunaire. En comparant sa mesure avec les données de ses prédécesseurs Timocharis d'Alexandrie (320 av. J.-C.- 260 av. J.-C.) et Aristillus (III<sup>e</sup> siècle av. J.-C.) il conclut que Spica s'était déplacée de 2° par rapport au point équinoxial d'automne. En outre il compara les longueurs de *l'Année tropique* (le temps que prend le Soleil pour retourner à l'équinoxe de printemps) et de *l'Année sidérale* (le temps que prend le Soleil pour retourner près d'une étoile fixe déterminée) et il nota une légère différence. Hipparque put donc conclure que les équinoxes bougeaient, ou « précédaient », à travers le zodiaque et que la vitesse de la précession était pas moins de 1° par siècle.

Figure 2.10 Précession des équinoxes du point de vue géocentrique. Le plan en rouge représente l'écliptique où se meut le Soleil ; le cercle blanc est l'équateur céleste, c'est-à-dire la projection de l'équateur de notre planète sur la sphère céleste. Est représenté aussi le cône précessionnel qui représente le mouvement de l'axe terrestre en environ 26.000 ans. (Planétarium de Milan, Auteur Mogi Vicentini, [www.mogi-vice.com](http://www.mogi-vice.com)) Video download- La précession équinoxiale (avi-DivX, 18 Mo).

Aujourd'hui nous pouvons expliquer la précession des équinoxes comme un mouvement de la Terre qui fait changer de manière lente mais continue l'orientation de son axe de rotation par rapport à la sphère idéale des étoiles fixes. L'axe terrestre subit une précession à cause de la combinaison de deux facteurs : la forme non parfaitement sphérique de la Terre (qui est un sphéroïde oblat, renflé à l'équateur) et les forces de gravitation de la Lune et du Soleil qui agissant sur ce renflement équatorial, produisent un *couple gravitationnel* qui tend à redresser la Terre, ou à faire coïncider le plan équatorial avec le plan de l'écliptique. Le résultat final n'est pas la superposition du plan équatorial avec l'écliptique, mais un mouvement de précession qui accomplit un tour complet chaque 25.000 années environ. La précession n'est pas parfaitement régulière parce que la Lune et le Soleil ne se trouvent pas toujours sur le même plan et se meuvent l'un par rapport à l'autre, en causant une variation continue de la force agissant sur la Terre. A cause du mouvement précessionnel la position des étoiles sur la sphère céleste change lentement au cours des siècles et des millénaires et change en particulier l'étoile qui se trouve en direction du pôle nord céleste. En 3000 av. J.-C. l'axe terrestre pointait

en direction de l'étoile Thuban dans la constellation du Dragon moins lumineuse que l'étoile Polaire actuelle. Dans environ 12.000 ans, au contraire, ce sera au tour de la très brillante Véga d'assumer le rôle d'étoile polaire. Le pôle sud se trouve dans une portion du ciel particulièrement vide d'étoiles brillantes. L'actuelle étoile polaire sud est *Octantis* qui est de magnitude 5,5 et donc à peine visible à l'œil nu.

Figure 2.11 La précession de l'axe terrestre implique qu'il prenne dans le temps diverses directions. Donc l'étoile qui joue le rôle d'étoile polaire change. (Wikimedia Commons ; user Dbachmann).

Sur la base de ce que nous avons considéré au chapitre 1 sur le phénomène des mégalithes, il est légitime de s'interroger sur le fait que l'observation répétée du ciel depuis des temps si anciens n'a pas pu conduire d'autres populations à la découverte habituellement attribuée à Hipparque de Nicée. La question a été longuement débattue et on ne peut donner une réponse définitive, si par le terme « découverte » on entend la reconnaissance explicite du phénomène attestée par un document écrit. Rien de tout cela n'a jamais été retrouvé. Cependant dans certaines civilisations existent des traces d'adaptations d'alignements astronomiques de constructions dans le but de réaligner des orientations rendues obsolètes par la précession avec le passage des siècles. Par exemple le temple de Louxor en Egypte ne se développe pas le long d'une ligne droite, mais son axe a été légèrement dévié pas moins de quatre fois, chaque fois à l'occasion d'un agrandissement qui a suivi au cours des siècles.[18]. Mais hélas, bien qu'il existe diverses descriptions de la cérémonie d'alignement des temples sur les étoiles, il manque des détails qui permettent de comprendre comment réellement la cérémonie avait lieu. Il n'est donc pas possible d'associer, sans aucun doute, l'alignement de l'axe du temple de Louxor avec une occurrence astronomique. Un autre exemple significatif est celui des temples à Medinet-Habu et de la chapelle d'Isis à Dendérah. Ces édifices sont alignés sur le lever héliaque de Sirius en 54 av. J.-C., cependant la chapelle a été érigée sur les fondations d'un édifice préexistant de l'époque de Ramsès dont l'axe était aligné sur la même occurrence astronomique environ 1250 ans auparavant et pour cela incliné d'environ 2,5 degrés. Entre 4000 et 2000 av. J.-C. le point vernal, c'est-à-dire le point de croisement entre l'écliptique et l'équateur céleste, là où le Soleil se trouve à l'équinoxe de printemps, était situé à l'intérieur de la constellation du Taureau. Du moment que le lever du Soleil au point cardinal – Est, à l'aube du jour de l'équinoxe de printemps était particulièrement significatif en Egypte et chargé de sens dans le monde agricole, on a donc souvent représenté Isis avec les cornes du taureau, symbole de royauté à l'intérieur duquel il y a le disque du Soleil. Mais à cause du mouvement de précession le Taureau perdra au cours des siècles le privilège d'accueillir le Soleil à l'équinoxe de printemps et celui-ci entrera dans la constellation du Bélier. Ce fait nous amène à considérer une autre question aux contours pas du tout clairs : les cultes de Mithra.

Mais avant rappelons la position de Giorgio de Santillana (professeur d'histoire des sciences au Massachusetts Institute of Technology) et Hertha von Dechend (de la Johann Wolfgang Goethe-Universität de Francfort) exprimée dans leur livre *Hamlet's Mill* de 1969 [19]. Les auteurs soutiennent l'idée que toutes les

civilisations archaïques avaient découvert la précession très tôt et que celle-ci constituait la racine commune de beaucoup, sinon de tous les mythes cosmologiques existant au monde. Cette thèse a été surtout ignorée par la communauté académique, mais la masse de données analysées dans *Hamlet's Mill* est imposante et c'est sans aucun doute un travail de pionnier.

Venons-en à la question de Mithra. Mithra est une divinité importante de l'Hindouisme et de la religion perse. Mais le nom Mithra est aussi le nom d'un dieu hellénistique romain qui fut adoré dans une religion de mystères du 1<sup>er</sup> siècle av. J.-C. au V<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. Ce qu'il y a de commun entre ces deux cultes n'est pas clair. A la fin du XIX<sup>e</sup> siècle le contenu de la religion de Mithra a été reconstitué par Franz Cumont comme une combinaison du culte syncrétique du Mithra perse avec d'autres divinités perses et probablement anatoliennes [18]. Après un important congrès qui s'est tenu à Manchester en 1971, les chercheurs soulignèrent, au contraire, les différences entre le nouveau culte et le culte indo-perse.

Figure 2.12 A cause de la précession des équinoxes, le point vernal, c'est-à-dire un des deux points où se croisent l'équateur céleste et l'écliptique, se déplace le long de l'écliptique. On montre ici son déplacement ces 6000 dernières années (Wikimedia Commons ; user Dachmann).

Les origines du culte de Mithra dans l'empire romain ne sont pas du tout claires et auraient été influencées surtout par la découverte de la précession des équinoxes par Hipparque de Nicée. Mithra, justement, serait la puissance céleste capable de causer le phénomène. Selon cette interprétation, à la découverte de la précession, aurait suivi l'identification d'une divinité correspondante au nouveau mouvement céleste, pouvant en outre déplacer le zodiaque et donc même plus puissante que le *fatum*.

Figure 2.13 Isis et le disque solaire entre les cornes du taureau. Relief provenant de Saqqarah ; la déesse est représentée avec le pharaon Nectanebo II de la XXX<sup>e</sup> dynastie (Louvre) (Wikimedia Commons ; user Neithsabes).

Mithra serait donc une religion caractérisée par une sorte de monothéisme pratique. Le culte se développa peut-être à Pergame au II<sup>e</sup> siècle av. J.-C. ; Ulansey, au contraire, pionnier dans ce domaine, en localise l'origine en Cilicie près de Tarse. Le dieu entre dans l'histoire gréco-romaine avec sur la tête un bonnet phrygien sous la protection du roi du Pont et des Parthes (nombre d'entre eux portèrent le nom de Mithridate, c'est-à-dire « don de Mithra »). Cependant ce nouveau culte ne devint jamais populaire en Grèce alors qu'il s'installa à Rome autour du 1<sup>er</sup> siècle ap. J.-C., se propagea à travers tout l'empire romain et par la suite fut accueilli par de nombreux empereurs comme religion officielle. Le sacrifice caractéristique de ce nouveau culte, absent dans le culte indo-perse, était la tauroctonie, c'est-à-dire l'abattage rituel d'un taureau. Les cultes de Mithra étaient diffusés dans tout l'Empire Romain mais pas en dehors, et étaient très

populaires auprès des légions. Dans chaque temple romain dédié à Mithra, la Mithraeum, la place d'honneur est dédiée à la représentation de Mithra en train d'égorger le taureau sacré. Mithra est représenté comme un jeune homme, un bonnet phrygien et un manteau qui flotte sur ses épaules alors qu'il saisit le taureau avec force, lui tirant la tête en arrière, le frappant au cou avec une courte épée. La représentation de Mithra est souvent montrée en diagonale, le visage tourné. Un serpent et un chien semblent boire à la blessure du taureau (d'où parfois sont représentées des gouttes de sang qui suintent) ; un scorpion au contraire essaie de blesser les testicules du taureau. Ces animaux sont justement ceux qui donnent leur nom aux constellations qui se trouvent sur l'équateur céleste, au voisinage de la constellation du Taureau.

Il reste beaucoup de questions sans réponses. En ce qui concerne l'histoire de l'astronomie la question principale est comment a pu naître dans la culture romaine un culte religieux concernant un phénomène astronomique, c'est-à-dire la sortie du point équinoxial de la constellation du Taureau et représentée symboliquement par l'abattage de l'animal, relatif à un événement vieux d'environ deux mille ans. Quelles ont été les sources culturelles et astronomiques qui l'ont produit ?

Figure 2.14 Culte de Mithra. Le dieu Mithra au moment où il tue le taureau sacré (tauroctonie). Côté A d'un relief romain de marbre à deux faces du II<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. (Louvre) (Wikimedia Commons, user Jastrow).

## 8 | La disparition du savoir hellénistique

Au cours de ce chapitre nous avons considéré l'état de l'astronomie de la période hellénistique autant qu'on puisse le faire sur la base des rares informations en notre possession. De tout le patrimoine de la science hellénistique entre le IV<sup>e</sup> et le II<sup>e</sup> siècle av. J.-C. ne nous sont parvenues que quelques œuvres. Nous avons deux attitudes possibles incompatibles entre elles face à cette situation.

- Nous pouvons croire que sont arrivés jusqu'à nous les livres les plus significatifs ;
- Nous pouvons croire qu'un *certain processus* sélectif ait écarté quelques œuvres au profit d'autres.
- La première alternative est celle qui a toujours été assumée par l'historiographie, selon le principe que plus un manuscrit était important, plus il était probable qu'il soit copié et recopié, par la suite traduit et que donc il survive malgré la perte du manuscrit original. Une analyse des sources antiques révèle que hélas les choses ne sont pas aussi simples. Euclide a été le plus célèbre géomètre de l'antiquité et cependant la moitié de ses livres ont disparu. Les œuvres intitulées *Données*, *Sur la division des figures*, *Optique et Phénomènes* ont survécues, alors que *Des lieux à la surface*, *Porismes*, *Sur les cônes*, *Pseudaria* et *Éléments de musique* sont perdus. Les *Éléments* furent conservés malgré la baisse de qualité des études alexandrines, ils résistèrent à la fin de la Bibliothèque qui se situe en 415 ap. J.-C. quand la mathématicienne Hypatie fut tuée. Elle avait travaillé avec son père

Théon (335-405 ap. J.-C.) à une édition des *Eléments* qui devint la version officielle de l'œuvre d'Euclide.

Figure 2.15 *Eléments* d'Euclide. Papyrus Oxirhynchus (P.Oxy. I 29 daté entre 74 et 125 ap. J.-C. Il s'agit d'un papyrus retrouvé à Oxirhynchus, localité à 160 km au Sud Ouest du Caire. Trouvé au cours d'une expédition de B.P. Grenfell et A.S. Hunt en 1896/97, il est actuellement conservé à l'Université de Pennsylvanie. C'est un des plus anciens fragments connus de l'œuvre d'Euclide. Le diagramme accompagne la Proposition 5 du Livre II des *Eléments*, avec d'autres résultats du Livre. (Wikimedia Commons ; user Jitse Niesen)

Par la suite les savants arabes furent fascinés par cette œuvre qui fut retraduite, recopiée des centaines de fois et enrichie de nombreux commentaires et sommaires. Pendant longtemps on pensa que l'édition arabe standard, basée sur celle de Théon, était de fait la plus ancienne des éditions grecques en circulation. Mais en 1808 François Peyrard démontra que la copie des *Eléments* conservée à la Bibliothèque Vaticane et par la suite soustraite par les armées de Napoléon et emmenée à Paris, était antérieure. En 1883-84 le savant danois J. L. Heiberg publia une reconstitution très soignée de l'œuvre, en repartant du texte original grec du manuscrit du Vatican ; cette version est jusqu'à maintenant la version la plus érudite d'où partent les savants. Malgré les recherches de Heiberg nous ne savons pas de combien le manuscrit du Vatican est antérieur à la rédaction de Théon qui apparut au moins sept siècles après l'original d'Euclide. La version du Vatican pourrait être antérieure de plusieurs siècles à celle de Théon, mais elle peut aussi avoir absorbé des siècles de changements dans les transcriptions, et à ce que nous savons pourrait différer radicalement de l'œuvre sortie des mains d'Euclide. Il est possible que les *Eléments* tels que nous les connaissons aient été en réalité la partie théorique d'une œuvre plus ample qui comprenait une section ultérieure, aujourd'hui perdue, relative à la résolution des problèmes de calcul numérique moyennant des constructions géométriques. Exactement des techniques de calcul nécessaires à toute la science hellénistique que nous avons considéré et dont il n'existe aucune trace.

Dans d'autres cas on a conservé des textes grâce à une série de circonstances exceptionnellement fortuites ; et cela est arrivé pour plusieurs œuvres d'Archimède. Malgré la renommée de leur auteur, il semble en fait que divers écrits d'Archimède, parmi lesquelles *la quadrature de la parabole*, aient survécus pendant des siècles en une seule copie : un codex préparé à Byzance au IX<sup>e</sup> siècle. Ce manuscrit aujourd'hui disparu, appartient à Frédéric II de Souabe et après la bataille de Bénévent en 1266 il finit à la Bibliothèque Vaticane ; il existait encore au XV<sup>e</sup> siècle, quand il fut copié en France et en Italie, mais on n'en a plus de nouvelles au siècle suivant. D'un autre manuscrit qui contenait différentes œuvres, qui avait probablement été donné au Pape avec le premier, on perd déjà les traces au XIV<sup>e</sup> siècle. De ce second manuscrit dérivait une version en latin du traité sur les flotteurs. La seule autre source pour les œuvres d'Archimède est le *palimpseste*, trouvé par Heiberg en 1906, perdu par la suite puis retrouvé.

Si nous n'avions aucune œuvre, notre connaissance d'Archimède se réduirait aux notices transmises par des auteurs tels que Plutarque, Athénée, Vitruve et Héron ; on se trouverait exactement dans les conditions où nous nous trouvons par exemple pour Ctesibius.

Le passage technologique entre rouleau, codex, parchemin et papier provoque une sélection nécessaire des textes à reporter sur de nouveaux supports, menant à des choix inévitables dictés par l'intérêt et l'utilité du texte en question ; ainsi nombre d'œuvres se perdent parce qu'elles ne sont pas reproduites. Le procédé même de la philologie consiste à tenter de remonter avec des critères de probabilité et linguistiques à la forme originale d'un texte, inévitablement corrompu par la succession des copies qui l'ont transmis depuis l'antiquité jusqu'à nous. Les premières traces d'une étude scientifique des textes remontent justement à la période hellénistique (IV<sup>e</sup> siècle av. J.-C.) et se rapportent à l'œuvre des premiers philologues qui opéraient auprès de la Bibliothèque d'Alexandrie, s'activant à rechercher la fidélité des copies des textes fondamentaux pour l'époque comme les œuvres d'Homère. Cette activité s'épanouira ensuite pendant l'humanisme. Il existe donc un coût qu'une société doit affronter au moment où elle décide de devoir assurer un avenir à une œuvre en la reportant sur un support nouveau parce que celui dont on dispose montre les marques du temps. Voilà le point critique pour la survivance d'une œuvre ; s'il n'y a qu'une seule copie en circulation et si le groupe des copistes potentiels a des priorités différentes, l'œuvre alors sera définitivement perdue. C'est vraisemblablement dans ce cas, du reste très concret, où des intérêts culturels doivent tenir compte du coût matériel de la reproduction, que s'active le processus sélectif de la *seconde alternative* présentée ci-dessus.

Mais pourquoi des copistes palatins dans la Byzance du VIII<sup>e</sup> siècle auraient-ils dû investir de l'argent dans la copie d'une œuvre de Séleucos qui leur était totalement incompréhensible ? N'exigeons pas de ces fonctionnaires byzantins une passion pour la culture et la conservation du savoir que ne montrent même pas nombre de gouvernements de notre époque. On ne peut pas évidemment mettre toute la faute sur le dos de ces malheureux copistes de l'interruption de la transmission du savoir hellénistique, c'est plutôt le climat culturel dans sa totalité qui a changé, du moment que n'existent plus les souverains des royaumes issus des cendres de l'empire d'Alexandre le Grand et qui rivalisaient dans la construction de bibliothèques. Maintenant le savoir n'est plus considéré comme un enjeu de compétition. A l'époque impériale romaine les anciennes bibliothèques sont devenues des butins de guerre et les rouleaux sont montrés à quelques rares hôtes des demeures patriciennes. Nous avons vu un exemple de ce comportement à propos des machines astronomiques d'Archimède transportées à Rome. Le savoir est respecté et honoré, bien sûr, mais comme quelque chose à contempler, fascinant par l'étonnement qu'il suscite, étranger cependant à un intérêt concret. Mais nous ne devons pas penser que ces situations soient seulement le propre de sociétés du passé où il était extrêmement onéreux d'assurer la transmission du savoir. Quelque chose de très semblable est arrivé au XX<sup>e</sup> siècle et concerne ce qui était sous les yeux de tout le monde, l'industrie du cinéma d'Hollywood. De façon incroyable une grande partie du cinéma produit dans les premières décennies est définitivement perdue. Un film perdu ou égaré est un long métrage ou aussi un

court métrage dont il n'existe plus aucune copie, ni dans les archives des studios, ni dans les collections privées. Souvent il ne reste de ces films que du matériel de papier comme des affiches ou des posters d'époque ou des photos de scène. Dans des cas rares il arrive que quelques films perdus soient retrouvés et restaurés. Nombre des premiers films ont été perdus parce que la nitrocellulose utilisée dans les pellicules était extrêmement instable et inflammable. Les incendies ont détruit les archives des films. Par exemple un incendie en 1937 a détruit tous les négatifs originaux de la Fox. En plus de ces faits, les films peuvent se détériorer rapidement s'ils ne sont pas conservés à une température et une humidité contrôlées.

Figure 2.16 L'actrice de cinéma muet Theda Bara (1885-1955) Des 40 films qu'elle a fait il n'en reste que trois et demi. On estime que 80% de tous les films produits entre 1894 et 1930 sont perdus. James Abbe's photo, 1920. (Wikipedia Commons ; user Aylaross).

Mais la principale cause de la perte des films muets a été la destruction intentionnelle, parce qu'on croyait qu'un film muet avait peu ou aucune valeur commerciale à la fin de l'époque du muet en 1930 (le premier film sonore, *le chanteur de jazz*, remonte à 1927). Les guerres aussi ont causé la disparition des films, bombardements et autres types d'explosions ont causé dans différents pays la perte des originaux dans les cinémathèques ou collections publiques et privées. Impossible de quantifier ce qui a disparu pour toujours durant le second conflit mondial en Italie, Allemagne, Japon et autres pays durement frappés par la guerre.

*La Martin Scorsese's Film Preservation Foundation* a estimé que près de 80% des films tournés de 1894 à 1930 (dont la presque totalité étaient des films muets) ont été perdus. Le cas de l'actrice américaine Theda Bara est particulièrement frappant : des 40 films qu'elle a fait, seulement trois et demi survivent. Ce fut pire encore pour sa rivale la vamp de la Fox, Valeska Suratt : aucun de tous les films qu'elle a tourné aux Studios ne fut sauvé. Plus typique est le cas de Clara Bow : de ses 57 films, 20 sont complètement perdus et cinq autres sont incomplets.

Robert A. Harris, de la National Film Preservation Foundation a déclaré [20]

« La majeure partie des premiers films n'ont pas survécus à cause de la course à l'enrichissement des studios. On n'a jamais pensé à préserver ces pellicules. On avait simplement besoin de place et les matériels nécessaires pour leur conservation étaient coûteux ».

Ces paroles ne vous rappellent-elles pas l'histoire que nous venons d'entendre à propos de la science hellénistique ? Il serait donc clair que la conservation d'un texte ne peut même pas être garantie par son autorité, du moment que celle-ci change avec le temps. Et pourtant le travail de reconstruction commencé par Lucio Russo par une minutieuse confrontation des sources littéraires a suscité une certaine indifférence de la part de quelques milieux d'historiens professionnels des sciences en général. On pourrait résumer la critique la plus courante en ces termes : « si cela s'était vraiment passé comme cela, on s'en serait sûrement aperçu ». En d'autres termes, si le tableau que nous nous sommes fait de

la science antique après des siècles et des siècles de redécouverte des classiques grecs et latins était gravement lacunaire, vraisemblablement les incohérences seraient déjà devenues évidentes. Il semblerait cependant que la littérature classique soit ponctuée de références quelquefois très explicites, relatives à des connaissances scientifiques radicalement différentes des conceptions pré-scientifiques d'Aristote. Mais ces textes n'ont pas été jusqu'à maintenant soumis à un examen critique, ni entrecroisés entre eux. De ce qui commence à émerger de la recherche des convergences entre les sources qui ont survécu, il semble qu'il faut abandonner une interprétation de l'histoire de la science et plus généralement de la civilisation antique, qu'on pourrait définir comme *primitiviste*. Selon cette lecture, le point culminant de la réflexion sur la nature commencé par les philosophes de l'école de Milet serait représenté par la pensée d'Aristote, alors que la technologie dans l'antiquité aurait eu un rôle tout à fait marginal tout au plus représenté par des prototypes. Pour que cette interprétation de l'histoire soit cohérente, le primitivisme doit inévitablement faire sien le principe selon lequel la transmission du savoir a été substantiellement efficace pour conserver les œuvres les plus significatives : par conséquent aujourd'hui nous aurions à notre disposition le meilleur de cette production culturelle.

Mais les choses se sont passées de manière complètement différente. Pendant le moyen âge et le début de l'ère moderne le but principal de l'activité intellectuelle consistera souvent inconsciemment, à récupérer lentement les résultats de la science hellénistique. C'est ce que démontrent entre autres les diverses « renaissances » qui s'épanouiront dans les civilisations qui auront accès au moins à quelques unes des œuvres produites dans la période hellénistique. Mais avant il nous faut traverser le collapsus de l'Empire Romain d'Occident.

## Chap. 3 - Tables planétaires

### 1 | La tentative de Boèce

L'année 476 marque la chute de ce qu'il restait de l'Empire Romain d'Occident. Autrefois on attribuait une grande importance à cette date qui marquait la ligne de partage des eaux entre l'Antiquité et le Moyen Age. Odoacre (env. 434-493) devient le premier souverain barbare qui ait régné sur Rome. Mais ce serait une erreur de penser que la déposition du dernier empereur romain, un garçon du nom de Romulus Augustule, ait été un choc pour les contemporains et autre part. Tout simplement, il ne paraissait plus nécessaire à Odoacre que l'Occident, dans ces conditions, ait encore un empereur et il poussa donc le sénat à expédier les insignes de l'empire à Constantinople, la capitale de l'Empire Romain d'Orient. Pour lui, le nouveau souverain réclamait le titre de « patrice » qui avait été celui d'Oreste, le général romain, père d'Augustule et ex secrétaire d'Attila. Les monnaies d'or frappées en Italie continuaient à imprimer le nom de l'empereur d'Orient Zénon même après 479. [21]

Ce fut Théodoric (493-526) roi des ostrogoths qui fonda le premier royaume romano-lombard sur le territoire italien. La domination des Ostrogoths ne dura que cinquante ans. A une époque où le bilinguisme gréco-latin, caractéristique de l'hellénisme, commençait à disparaître, les romains cultivés acceptèrent de collaborer avec le roi ostrogoth en qualité de traducteurs. Parmi ceux-ci, il y eut Anicius Manlius Severinus Boèce (env. 480-524) qui mit en chantier un projet de traduction en latin des classiques de la philosophie grecque. C'était pour lui une tentative désespérée d'assurer un avenir aux œuvres de culture grecque avant qu'il ne soit trop tard. Il se proposa donc de traduire et de commenter toutes les œuvres d'Aristote et de Platon qu'il avait réussies à se procurer. Mais, il fut condamné à mort par Théodoric pour avoir dénoncé des injustices alors que son entreprise était à peine commencée. Mais ce qu'il réussit à faire fut de remarquable importance. Il traduisit et commenta divers écrits grecs de logique et les présenta avec des écrits d'auteurs latins comme Cicéron ; c'est ainsi que les savants des siècles suivants purent disposer d'un *corpus* d'écrits d'origine diverses qu'ils pouvaient comparer, en s'exerçant à une analyse critique. Boèce avec son œuvre codifia la tradition mathématique héritée, en celle qui deviendrait ensuite la structure des études scientifiques dans les universités médiévales organisée dans les disciplines du *Quadrivium*, (littéralement « quatre voies ») qui comprenait Arithmétique, Géométrie, Astronomie, Musique. [22] A celles-ci s'ajoutaient celles du *Trivium*, relatives aux disciplines philosophico-littéraires, c'est-à-dire la Grammaire (la langue latine), la Rhétorique et la Dialectique c'est-à-dire la philosophie. Mais Boèce avait une connaissance des mathématiques plutôt limitée et ses écrits sur le sujet sont de qualité médiocre et bien que son texte de géométrie, *De institutione geometrica*, n'ait pas survécu, il n'y a pas de raison de penser qu'il était meilleur que les œuvres arrivées jusqu'à nous. Même le traité d'astronomie *De institutione astronomica* a été perdu. Malgré cela ses textes de mathématique ont été les meilleurs à disposition et furent utilisés pendant de nombreux siècles dans une

période où la culture mathématique en Europe avait atteint un bas niveau épouvantable. L'*Arithmétique* de Boèce est basée sur les travaux de Nicomaque de Gérase (env. 60 ap. J.-C. – env. 120 ap. J.-C.) auteur important de formation pythagoricienne. Elle constitue pour les étudiants du moyen âge la base pour les études de la théorie des nombres. Jusqu'au XII<sup>e</sup> siècle les œuvres de logique de Boèce représentèrent la base de la formation des savants et furent généralement dites *Logica vetus*, c'est-à-dire la logique antique.

### Etymologie « mathématique »

Le terme « *mathématique* » dérive du latin « *mathematica* », provenant à son tour du grec ancien « *mathematike techne* » (science mathématique) féminin singulier de « *mathematicos* » (adj. « relatif à la mathématique, scientifique ») de « *mathema* » (« science, connaissance, connaissance mathématique ». Il est en corrélation à « *manthanein* » (apprendre) formé sur la base Proto-indo-européenne \**mn-/\*men/\*mon-* (« penser, avoir l'esprit stimulé »). Cette base est à confronter au grec « *menthere* » (s'intéresser), avec le lithanien « *mandras* » (« complètement réveillé »), avec « *madru* » (« sage « en Ancien Slave Ecclésiastique), et enfin avec le gothique « *mundosis* » (« regarder »). La langue gothique, disparue depuis le XVI<sup>e</sup> siècle est la seule langue germanique orientale dont on a retrouvé des textes. Parmi les autres langues qu'on suppose appartenir aux langues germaniques orientales, il y a la langue vandale, la langue Burgonde, et la langue gothique de Crimée. On pense que le gothique de Crimée a survécu jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle.

Si la déposition de Romulus Augustule ne fit pas grand bruit, il en alla différemment les décennies suivantes. L'Italie, cœur de l'Empire Romain, allait entrer dans la guerre la plus catastrophique de son histoire : la *Guerre des Goths* (535/553). Il s'agit d'un long conflit qui oppose l'Empire Byzantin aux Ostrogoths. L'empereur d'Orient Justinien 1<sup>er</sup> avait pour but la reconquête des provinces italiennes pour l'empire ainsi que les régions limitrophes. Son rêve, la *Restauratio Imperii*, était de ramener l'Empire Romain à son antique splendeur, sous le guide d'un seul empereur et le siège du gouvernement à Constantinople. Dès lors, la *Pars Orientalis Imperii Romani*, c'est-à-dire l'empire romain d'Orient, sera désigné par les historiens par l'adjectif « byzantin ». Le terme « byzantin », dérivé de Byzance, ancien nom grec de la capitale impériale Constantinople, n'a jamais été utilisé pendant toute la durée de l'empire (395/1453) : Les byzantins se considéraient Ρηωμαιοι (Rhomaioi (romei), ou romains en langue grecque), et appelaient leur état Βασιλεια Ρηωμαιον (Basileia Rhomaion, c'est-à-dire, royaume des romains) ou simplement Ρηομαιον (Rhomania). Il est donc intéressant de remarquer que les byzantins s'appelaient eux-mêmes « romains » bien qu'ils parlent grec, et que les musulmans en conquérant leurs territoires, fondèrent le sultanat de « Rum », alors que les européens occidentaux étaient appelés « latins » (à cause de leur langue). En réalité les historiens ne sont pas d'accord sur la date où on devrait arrêter d'utiliser le terme « romain » pour le remplacer par le terme « byzantin ». La date généralement acceptée par le monde académique comme début de la période

byzantine est 610, année de l'accession au trône de Héraclius 1<sup>er</sup> de Byzance. Celui-ci modifia remarquablement la structure de l'Empire, proclama le grec langue officielle en remplacement du latin et assumait en outre le titre impérial de *basileus*, au lieu de celui d'*augustus* utilisé jusqu'alors.

Figure 3.1 *Macrobius Commentarii in Somnium Scipionis* (V<sup>e</sup> siècle). Diagramme qui illustre les éclipses solaires et lunaires. Parchemin (env. 1150) Des œuvres telles celles de Macrobie permirent de conserver durant le moyen âge en Europe des concepts fondamentaux comme la sphéricité de la Terre et les sept sphères des planètes. (Wikimedia Commons ; user Leinad-z)

La transmission de la culture hellénistique au monde islamique et ensuite latin, le rôle des byzantins dans la civilisation des peuples slaves, le schisme de la chrétienté, les crises balkaniques et du Moyen Orient, de tout cela il résulte que l'histoire de l'Empire Byzantin, loin d'être une affaire lointaine et oubliée, apparaît comme une clé de lecture importante de l'actualité. Mais dès le début de l'histoire byzantine les rapports entre « latins » et « rhomaïoi » sont difficiles. Quand les romains italiens s'aperçoivent que les romains d'Orient venus de loin pour les libérer des ostrogoths sont eux aussi des étrangers, soit parce qu'ils parlent une langue inconnue, le grec, soit parce qu'ils ont un aspect étranger, (les troupes byzantines sont le plus souvent recrutées en Asie Mineure), ils ne les considèrent pas du tout comme des « frères » venus les libérer.[21] La guerre des Goths laisse une Italie dévastée, Rome subit quatre sièges et change de main cinq fois. C'est lors de ces sièges à répétition que l'Urbs perd son immense patrimoine architectural. On estime que environ trente mille statues de bronze sont fondues seulement durant ces sièges et qu'environ deux cent cinquante mille colonnes de marbre sont tombées et sont réutilisées pour renforcer les portes de la ville et même comme armes. Au terme de quatre sièges désastreux, Rome est l'ombre d'elle-même ; à l'intérieur de l'énorme ville, qui avait eu un million et demi d'habitants, quinze mille personnes errent perdues, souvent de nobles païens réchappés de la mort, le peuple survivant et la cour du Pape. La peste commence à se répandre dans l'immense ville, de nombreuses zones sont fermées par des murs, abandonnées et vidées de leurs habitants. L'historien byzantin Procope parle de quinze millions de morts ; les historiens modernes estiment que la population italienne s'est effondrée de sept à deux millions et demi à cause de la disette et des épidémies qui ont suivi la guerre. La reprise de la démographie et de l'économie de l'Italie commencera timidement à se profiler seulement à l'époque carolingienne (IX<sup>e</sup> siècle) et ne sera pas achevée avant la naissance et le développement des premières communes (XI<sup>e</sup> siècle).

On comprend comment dans ce contexte politique et économique toute activité intellectuelle ait été difficile et l'état des œuvres produites dans la période de la chute du dernier empereur romain en est un témoignage éloquent. Le *De nuptiis Philologiae et Mercurii* du carthaginois Martianus Capella (env. 365/440) était une allégorie d'un mariage où sept servantes présentent un abrégé de l'astronomie et des six autres arts libéraux. Ambroise Théodore Macrobie, lui aussi originaire d'Afrique du Nord et qui a vécu au début du V<sup>e</sup> siècle, a été l'auteur d'un

commentaire au *Somnium Scipionis* de Cicéron. Il comprenait aussi un simple traité d'astronomie où étaient exposées des notions élémentaires comme la sphéricité de la Terre placée au centre de l'univers et la présence des sept sphères planétaires, enfermées par la sphère des étoiles fixes. Des œuvres comme celles de Macrobe permirent de conserver des concepts fondamentaux tels que la sphéricité de la Terre et sa localisation au centre d'un univers sphérique, en plus de la distinction entre les sept « planètes » et les étoiles fixes. Mais la connaissance de l'astronomie vers la seconde moitié du premier millénaire chez les latins était à un niveau tout à fait élémentaire.

La même année où naquit Boèce, ou à peu près à cette date, vient au mode un autre personnage lui aussi destiné à changer le visage de l'Europe dans les siècles à venir : Benoit de Norcie (480/547), fondateur de l'ordre des bénédictins et du monachisme occidental. A l'intérieur de l'abbaye de Montecassino, qu'il fonde en 529, fonctionne un *scriptorium* actif jusqu'au XV<sup>e</sup> siècle. Le scriptorium est cette partie d'un complexe monastique dédiée à la copie des manuscrits, habituellement en étroite collaboration avec une bibliothèque. De tels milieux eurent souvent une grande importance culturelle soit par leur action de sauvegarde de la culture latine antique soit parce qu'ils constituèrent des lieux de pensée et de développement d'une nouvelle culture. A Montecassino, Benoit vécut jusqu'à sa mort, recevant l'hommage de plusieurs personnalités comme Totila roi des Ostrogoths, que le moine semonça. La Règle de l'Ordre de saint Benoît ou *Sancta Regula*, dictée par Saint Benoit de Norcie en 534 se compose d'un Prologue et de soixante treize chapitres et prévoit un temps pour la prière et un temps pour le travail et l'étude (*Ora et Labora*). La règle spécifie les différentes attributions et activités des moines, parmi lesquelles celle de de l'écriture et l'étude non seulement des Saintes Ecritures, mais aussi celle des Sciences et des Arts. Ecrire, qu'on copie ou non, est considéré comme une activité manuelle, et donc humble et dégradante selon la culture antique. Dès la fin du VI<sup>e</sup> siècle les premières règles monastiques incluent l'écriture parmi les activités que l'homme doit accomplir pour mener une vie pieuse. Les bibliothèques bénédictines remplissent la très importante fonction de préserver, après la chute de l'Empire Romain, les connaissances antiques en recueillant ce qui était récupéré dans les ruines.

Avec les Bénédictins la rigueur du travail manuel et intellectuel créé au Moyen Age une situation unique et exceptionnelle : en étudiant les textes antiques, ils conservent des notions désormais oubliées dans le domaine scientifique et agricole qu'ils mettent à profit dans leurs monastères et qui, par imitation se répandent aussi à l'extérieur. Par exemple, il faut rendre aux Bénédictins le mérite pendant la renaissance médiévale de leur intérêt pour la littérature médicale et la culture des herbes médicinales à usage thérapeutique. Aux enseignements du passé, les moines ajoutent la pratique de la médecine comme un devoir éthique de chrétien. Dans la Règle on impose qu'au moins deux moines dans chaque couvent soient chargés de soigner les malades dans les locaux mêmes du couvent dans une zone non fréquentée par les frères. A ce sujet, le cas de Salerne est tout à fait exemplaire, où un monastère dans les faubourgs de la ville organise, dès 820, une infirmerie ouverte aux gens de l'extérieur ; ils contribuent ainsi à la naissance de la fameuse *Schola medica salernitana* Elle est la première et la plus importante institution médicale d'Europe au Moyen Age, fondée au IX<sup>e</sup>-X<sup>e</sup> siècle, et comme

telle considérée comme le précurseur des universités modernes. La Schola continue la tradition médicale grecque et latine, la fondant dans la tradition arabe et hébraïque. La rencontre des différentes cultures mena à une synthèse et à une comparaison des différentes traditions médicales.. Cela est mis en évidence par la légende qui raconte l'origine de l'école qui fut fondée par quatre maîtres : le juif Helenus, le grec Pontus, l'arabe Adela et le latin Salernus. Il faut remarquer que dans la *Schola* les femmes sont admises soit comme enseignantes soit comme étudiantes. Trotula de Ruggiero (XI<sup>e</sup> siècle) est la plus connue parmi les *mulieres salernitanae* ou ce cercle de savantes qui enseignent et sont actives dans l'Ecole médicale de Salerne. Née à Salerne de la noble famille des De Ruggiero, Trotula a la chance d'entreprendre des études supérieures et de médecine. Elle est célèbre dans toute l'Europe durant le moyen âge, et surtout pour ses études liées au domaine féminin

C'est à l'activité des scribes qu'est lié le personnage romain Flavius Magnus Aurelius Cassiodore (490/583) qui fonde à Squillace, en Calabre, le monastère de Vivario dédié à l'étude et à l'écriture. Là, il crée un scriptorium pour la collecte et la reproduction de manuscrits, modèle dont par la suite s'inspirent les monastères médiévaux. Le scriptorium de *Vivarium* est le premier dont on a un témoignage historique précis. Il fait partie d'un complexe monastique construit par Cassiodore au VI<sup>e</sup> siècle. En personne cultivée, Cassiodore dans ses *Istituzioni*, recommande le plus grand soin dans la transcription des textes sacrés. Mais il n'oublie pas non plus, peut-être justement à cause de son éducation classique, de faire copier des textes d'auteurs païens. A l'âge vénérable de 92 ans Cassiodore rédige le traité *De Orthographia*. Le scriptorium est actif au moins jusqu'en 630

Il faut cependant examiner la composition du capital littéraire dont disposent les Bénédictins pour le recopier dans les *scriptoria*. Il vient essentiellement de la tradition du bas empire, qui, comme nous l'avons vu, est complètement étrangère à la pensée scientifique ; mieux, en plus d'un millénaire, la romanité n'a pas produit un seul mathématicien. Il n'existe donc pas en Occident de copies en latin d'Archimède, Euclide, ou Hipparque, mais seulement des commentaires divulgués, comme dans le cas de Cléomède et de son œuvre *Coelestia* que nous avons considéré à propos d'Eratosthène. Bien que le Monachisme bénédictin ait contribué à la survie de la civilisation il ne peut pas sauver ce qu'il n'a pas reçu en héritage, c'est-à-dire la science hellénistique. Mais dans les régions orientales de ce que fut autrefois l'Empire Romain, les choses se passeront différemment.

Dans la première moitié du VI<sup>e</sup> siècle, on a en fait dans le monde byzantin, une sorte de réveil d'intérêt envers la science hellénistique. Parmi les représentants les plus importants il y a Simplicius (env.490/560), Jean Philoponus(490/570), Eutocius (env.480/540), Antémios de Tralles (474/534) et Isidore de Milet (442/537), tous élèves d'Ammonius d'Hermia (440/523).[9] Eutocius écrit un commentaire sur quelques œuvres d'Archimède et d'Apollonios. Jean Philoponus s'intéresse aux mathématiques et écrit un ouvrage sur l'astrolabe. Critiquant l'explication aristotélicienne qui attribue le mouvement à l'effet de l'air, il découvre la cause du mouvement dans une *vis cinetica* détenue par une flèche au moment du lancer par exemple. Philoponus, auteur d'écrits qui sont à l'origine de la théorie médiévale de l'élan, est connu surtout comme commentateur d'Aristote, à l'égal de Simplicius. Isidore de Milet est un architecte qui avec Antémios de

Tralles fait les plans de la basilique Sainte Sophie à Constantinople, publie une édition des œuvres d'Archimède et écrit des commentaires sur Héron. Dans ce milieu, on remarque plusieurs œuvres hellénistiques inconnues des savants alexandrins des premiers siècles de notre ère. Par exemple Simplicius est l'unique source explicite sur l'œuvre perdue d'Hipparque relative au mouvements des corps. Peut-être que le déplacement du centre de gravité culturel d'Alexandrie vers Byzance a permis l'acquisition d'œuvres restées en Orient, qui ne sont jamais entrées dans la tradition alexandrine. Mais il faut dire que le niveau d'originalité scientifique des auteurs appartenants à cette « renaissance byzantine » est à peu près nul.(9]

### **Le mystérieux feu grégeois**

Avec le terme Feu grégeois (grec *ιγρον πυρ*)- *igron pyr*) on indique une arme incendiaire employée par les byzantins dans les batailles navales et les sièges. Ce mélange, on présume de poix, salpêtre, soufre, naphte et chaux vive, a la caractéristique, déconcertante pour l'époque, de continuer à brûler au contact de l'eau. Son invention est attribuée à un grec originaire de la ville d'Héliopolis du nom de Callinique ; cette technologie est responsable de nombre de victoires décisives pour la survie de l'Empire Byzantin, surtout durant le second siège de Constantinople par les Arabes musulmans, entre 717 et 718. Les informations en notre possession sur le feu grégeois sont exclusivement indirectes, basées sur des manuels militaires byzantins et d'autres sources historiques secondaires comme les écrits de Anne Comnènes (1083-1153), historienne et princesse byzantine, et sur les récits de plusieurs chroniqueurs d'Europe souvent peu sérieux. On considère le feu grégeois comme une invention du VII<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. mais plusieurs sources en attestent l'usage déjà au V<sup>e</sup> siècle. La formule du mélange qui compose le feu grégeois ne nous est pas parvenue ; elle est connue seulement de l'empereur et de quelques artisans spécialisés et est gardée avec une telle méfiance que la loi punit de mort quiconque divulgue à l'ennemi ce secret. Les ingrédients et le processus de fabrication et de développement du feu grégeois sont le secret militaire le mieux gardé de l'histoire. Si rigoureusement que, encore aujourd'hui on spéculer sur la composition chimique du mélange. Ce qui est clair c'est que le feu grégeois est mieux compris s'il est interprété comme un système complexe d'armement constitué de nombreux composants qui doivent opérer ensemble pour être efficace. C'est pourquoi celui-ci comprend non seulement la formule de la composition, mais aussi des navires. Les *dromons* byzantins, spécialisés à cet usage. Le dispositif utilisé pour préparer la substance en la réchauffant et en la pressurant est un siphon qui lance le mélange incendiaire et est utilisé par une équipe de spécialistes : les *siphonarioi*. Les informations sur l'ensemble du système d'armement sont hautement subdivisées, avec des opérateurs et des techniciens qui connaissent les secrets relatifs à un seul composant, garantissant ainsi la sécurité. En est la preuve que, quand les Bulgares prennent les villes de Mesembrie et Debeltos en 814, il capturent 36 siphons de la substance mais sont incapables d'en faire usage. Il est vraisemblable que cette mystérieuse technologie dérive des études de la chimie de la période hellénistique ; ces études sont habituellement classées comme « alchimie », mais la première documentation existante concernant

ce qu'on désigne par alchimie remonte aux écrits de Zozime de Panopolis, un alchimiste du IV<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. Par un tel terme on entend une tradition syncrétique qui comprend la philosophie naturelle grecque, la magie égyptienne, des références aux religions hébraïque et chrétienne, des procédés chimiques empiriques. Mais à l'époque de Zozime, la science hellénistique a déjà disparue et est remplacée par des philosophies irrationalistes. Il est resté bien peu de chose des œuvres les plus anciennes et les tentatives de reconstruction de la chimie hellénistique sont rendues difficiles par la confluence de celle-ci avec l'alchimie des siècles suivants polluée par des connotations ésotériques. C'est le même parcours que suit l'astronome qui s'abaisse à être un instrument de l'astrologie. On peut tirer quelques indications des papyri retrouvés. Du papyrus de Leyde, on peut déduire que les chimistes alexandrins devaient connaître au moins en partie le concept d'acide.

Figure 3.2 : Bateau byzantin de la fin du XI<sup>e</sup> siècle armé de feu grégeois. Madrid, Manuscrit Silitzes, (XII<sup>e</sup> siècle) (Wikimedia Commons ; user Gun Powder Ma)

En traitant le mouvement des corps, Philiponus repousse l'idée aristotélicienne que les corps plus lourds tombent plus vite et décrit l'expérience qui a été longtemps attribuée à Galileo Galilei (1564-1642) et à son précurseur Stevin (1548-1620) : en laissant tomber deux corps de poids différent, ceux-ci rejoignent le sol en même temps. Ce fait l'a fait apparaître comme un précurseur, par rapport aux deux scientifiques modernes, sur la voie de la compréhension et de l'affirmation de la signification du principe d'équivalence, en réalité sa source est selon toute probabilité Hipparque. Etant le dernier scientifique hellénistique qui, à ce que nous savons, se soit occupé du mouvement des corps, si le résultat rapporté par Philiponus lui est inconnu, il serait bien difficile d'expliquer comment il est connu de Lucrèce (env. 99 – 55 av. J.-C.) (*De rerum natura*, II 225-239). C'est la même situation que nous rencontrons à propos des sources du passage de Sénèque sur la rétrogradation des planètes. La présence dans des œuvres de cette époque, de connaissances qui ne nous sont pas connues autrement, fait dater souvent du VI<sup>e</sup> siècle plusieurs résultats scientifiques et technologiques appartenants à la science hellénistique.[9]

## 2 | Astronomie islamique

Autour de 350 ap. J.-C. l'évêque Jacob de Nisibis fonde une école à Edesse en Asie mineure. La langue qu'on y parle est le syriaque, on étudie aussi le grec et on y traduit plusieurs écrits d'Aristote et du médecin Galien. En 489 l'école est fermée par l'empereur Zénon et plusieurs savants émigrent plus à l'est, à Gundishapur, en Iran occidental. Là ils traduisent du grec en syriaque des ouvrages de médecine et d'autres sujets, la quantité des œuvres traduites est modeste mais suffit à fournir un échantillon des richesses culturelles disponibles pour qui pouvait

comprendre le grec.[23] Mais c'est sous le gouvernement sassanide de Chosroès Ier (531-579) que Gundeshapur devient célèbre pour la médecine et l'érudition scientifique. Chosroès offre un refuge aux différents philosophes grecs, chrétiens syriaques et nestoriens qui fuient les persécutions religieuses de l'Empire byzantin. Les Sassanides depuis longtemps combattent romains et byzantins pour le contrôle de ce qui est aujourd'hui l'Irak et la Syrie et sont naturellement prêts à accueillir leurs réfugiés. Le roi donne mission à ces savants de traduire des textes grecs et syriaques en pahlavi. Ils traduisent des travaux variés de médecine, astronomie, astrologie, philosophie et de caractères technologiques. Les philosophes restent sans doute longtemps à la cour de Chosroès Ier. Puis à la suite d'un accord signé entre le souverain sassanide et Justinien, on leur permet de retourner dans leur patrie. Selon le témoignage de l'historien byzantin Agathias (536-582/594) cela arriva en 532 (*Histoires*, 30-31). L'épisode de l'émigration en Perse de ces philosophes, sur lequel nous sommes si mal informés, revêt un double intérêt. En premier lieu, il pourrait avoir contribué à l'intérêt pour le néoplatonisme encore perceptible en Orient à l'époque islamique. En outre ces intellectuels pourraient avoir trouvé en Perse des écrits hellénistiques qui n'étaient plus disponibles en Occident : par exemple Priscien le Lydien est notre meilleure source de l'ouvrage sur les marées de Posidonius (env. 135 – 50 av. J.-C.). Le texte de Priscius, les *Solutiones ad Chosroem*, qui contient des réponses du philosophe au souverain sassanide, à l'origine écrit en grec, nous est arrivé seulement à travers une traduction latine très corrompue faite peut-être en France au IXe siècle.[5]

Figure 3.3 Illustration d'Al Biruni (973-1048) des phases de la Lune. De l'ouvrage *Kitab al-tafhim* (en persan). (Wikimedia Commons ; user Laurascudder)

En 570 Mahomet naît à la Mecque. Après sa mort, survenue en 632, la religion qu'il a fondée commence à se répandre rapidement au Moyen-Orient, en Afrique septentrionale et atteint l'Espagne. En 762 ses successeurs au Moyen-Orient fondent une nouvelle capitale Bagdad, sur la rive du Tigre, à peu de distance des médecins chrétiens nestoriens de Gundeshapur. Il s'ensuit que des membres de la cour de Bagdad appellent les médecins chrétiens pour quelques consultations et ces rencontres sont l'occasion pour les hauts fonctionnaires islamiques de prendre connaissance d'un trésor culturel provenant de l'antiquité.[24] Mais ce patrimoine est conservé dans des manuscrits attendant dans de lointaines bibliothèques et écrits dans une langue étrangère. C'est pourquoi Hârûn al-Rashîd, devenu calife en 786 et ses successeurs, envoient des fonctionnaires dans l'Empire Byzantin pour y acheter des manuscrits grecs, et au début du IXe siècle le calife al-Ma'mûn fonde à Bagdad un centre de traductions le *Bait al Hikmah*, la *Maison de la Sagesse*, où les savants de langue syriaque et arabe, sous la direction du chrétien nestorien al-Ibadi (808-873) traduisent en arabe des œuvres grecques soit de l'original, soit de versions syriaques. Du moment que l'arabe est la langue du Califat qui s'étendait de Kaboul en Afghanistan à Tolède en Espagne, la traduction de ces œuvres en arabe en assure une ample diffusion. Enfin grâce à l'avancée des chrétiens d'Espagne contre les Maures au XIIe siècle, ces manuscrits arrivent entre les mains des Occidentaux et nombre d'entre eux sont traduits en latin. Malgré le parcours laborieux de ces

œuvres grecques, qui au travers de traductions en syriaque, arabe et enfin en latin perdent de leur valeur, elles sont cependant fondamentales pour assurer la transmission en Occident de cette partie de la pensée astronomique hellénistique qui a été sauvée aux temps du Bas Empire et du Haut Moyen Age.

Comme toutes les bibliothèques de Bagdad, la Maison de la Sagesse est elle aussi détruite durant l'invasion mongole de Bagdad en 1258. On raconte qu'on vit les eaux du Tigre devenir noires pendant six mois à cause de l'encre provenant de l'énorme quantité de livres jetés au fleuve. Les ressources culturelles que les arabes ont à leur disposition sont considérables. L'Égypte, berceau du savoir d'Alexandrie, a été conquise par les arabes et c'est ainsi que la culture qui a survécu contribue elle aussi à l'activité scientifique du Califat. Les monastères chrétiens du Moyen-Orient subissent le même sort avec leurs bibliothèques de textes grecs. C'est ainsi que l'Islam a accès, quand il ne les contrôlent pas directement, aux savants et à la culture de l'Empire Byzantin, de l'Égypte, de la Syrie, de la Perse et des territoires plus à l'est, y comprise l'Inde. Jusqu'en 1300 la civilisation islamique donne des preuves d'un remarquable dynamisme, puis cet élan s'épuise.

Il nous est parvenu environ dix mille manuscrits d'astronomie en arabe, persan et turc, qui continuent à dormir sur les rayons des bibliothèques attendant qu'on les étudie.[23] mais il semble évident qu'une partie de ces écrits traite en réalité de pratiques religieuses. Les écrits d'astronomie d'un autre genre sont relativement rares même s'ils sont d'une remarquable importance historique. Dans ces œuvres les astronomes mathématiciens de l'Islam tentent de perfectionner les modèles planétaires de Ptolémée contenus dans l'Almageste ou approfondissent les questions relatives à la nature du cosmos en opposition avec les philosophes. Les pratiques religieuses génèrent surtout trois problèmes spécifiques auxquels les astronomes mathématiciens tentent de trouver une solution. Le premier est le calendrier lunaire, hérité des temps pré-islamiques. Il s'agit de mettre en accord l'année, et donc les saisons, (qui sont une question qui concerne le mouvement annuel de la Terre autour du Soleil), avec le « mois » (qui est un concept déterminé par le mouvement de la Lune autour de la Terre), deux phénomènes complètement indépendants l'un de l'autre, c'est pourquoi une année solaire ne contient pas un nombre entier de mois lunaires. Résoudre ce problème nécessite l'introduction de mois intercalaires pour maintenir l'année plus ou moins en phase avec les saisons, mais il semble que Mahomet se soit prononcé contre cette intercalation si bien que l'année islamique est encore aujourd'hui plus courte de onze jours par rapport à l'année des saisons. Et c'est pour cette raison que le mois sacré du jeûne, le Ramadan, peut se présenter à n'importe quelle saison.

Figure 3.4 Modèle Ibn al-Shatir (1304-1375) sur le mouvement de Mercure. On adopte le « couple de Tusi » qui permet d'éliminer l'équant et l'excentrique de Ptolémée. (Wikipedia Commons ; user Konstable)

Le second problème causé par la pratique religieuse est dicté par les temps consacrés à la prière quotidienne. Ceux-ci fixés au nombre de cinq sont déterminés par une formule approximative d'origine indienne qui permet de corréliser ces

« heures » à la progression de la longueur des ombres. La nécessité de traduire ces règles empiriques en heures et minutes précises stimule l'intérêt des astronomes islamiques.[23] Un membre de la Maison de la Sagesse, au début du IXe siècle, al-Khwârizmî compile des tables pour l'heure de la prière à la latitude de Bagdad. De la déformation de son nom dérive la terme moderne *algorithme*

La troisième question qu'affrontent les astronomes est le problème de l'orientation des mosquées vers la Mecque, connue sous le nom de *qibla*, ou « orientation sacrée ». A Damas au XIVe siècle al-Kalili prépare une table qui fournit la qibla pour chaque degré de latitude de 10° à 50° et pour chaque degré de longitude de 1° à 60° à l'est et à l'ouest de la Mecque. La table est rédigée au moyen d'une formule compliquée et scrupuleuse.

### **Modèle mathématique**

Un modèle mathématique est la représentation d'un phénomène, d'objets empiriques ou de processus physiques, décrits de manière logique ; il se réfère seulement à quelques aspects du phénomène en question. Ce n'est donc pas une simple description verbale, mais le processus est analysé de manière formelle et abstraite, sans ambiguïté, moyennant des instruments mathématiques. Un modèle est la représentation conceptuelle du Phénomène, c'est-à-dire de nos idées ou connaissances relatives à un phénomène, mais non le phénomène en *soi*. Quand nous analysons le mouvement d'un projectile nous étudions *ce projectile* particulier, non tous les projectiles bien sûr, et nous assumons donc implicitement que notre projectile occupe le rôle de prototype. C'est pourquoi nous déclarons que les inévitables défauts de fabrication, pour donner un exemple, ne jouent aucun rôle. Nous avons donc déjà « filtré » la réalité en choisissant ce qui mérite d'entrer dans le modèle ou non. Ce que nous avons formalisé n'est pas la « réalité », mais certaines de nos « opinions » sur elle.

Au IXe on traduit l'Almageste de Ptolémée en arabe sous l'impulsion du calife Al-Ma'mûn. L'efficacité des modèles planétaires qui y sont exposées dépend aussi critiquement de la précision des paramètres numériques utilisés et comme bien des siècles sont passés depuis Ptolémée, des améliorations sont rendues inévitables. L'astronome grec a montré aux lecteurs comment dériver les paramètres des observations et les astronomes islamiques mettent à profit ses enseignements. Nombre des observations qu'ils enregistrent sont effectuées dans le but d'améliorer les valeurs utilisées par quantité comme l'excentricité de l'orbite solaire ou l'obliquité du plan de l'écliptique. Tout ceci amène à un certain intérêt pour l'observation astronomique, et si au début les instruments sont petits et portables, avec le temps se développent des instruments plus perfectionnés et de plus grande dimension. Grâce aux financements des souverains et des mécènes, ces grands instruments sont installés dans des édifices appropriés qui furent le début des observatoires astronomiques. Il arrive souvent que l'hostilité des autorités religieuses envers l'astrologie a comme conséquence que la mort du mécène, ou l'acharnement de cette hostilité, mettent un terme aux observations. Les observatoires d'astronomie du Caire et de Istanbul, ce dernier construit entre 1575 et 1577 sont même détruits. Seuls les observatoires de Marâgha, dans l'Iran

septentrional de l'astronome perse al-Tûsî et celui de Samarkand, en Asie Centrale de l'astronome Ulugh Beg (1394-1449), n'eurent pas une vie éphémère. Un important résultat obtenu par l'observatoire de Samarkand est une collection de tables astronomiques et un catalogue de 1000 étoiles, le plus important du Moyen Age. Mohamed al-Bâtânî (850-929) connu en Occident sous le nom d'*Albatenius*, passe sa vie à al-Raqqa sur le fleuve Euphrate ; il est un des nombreux astronomes islamiques qui acceptent le modèle de Ptolémée en en corrigeant cependant quelques paramètres. Ses tables arrivent en Europe à travers l'Espagne musulmane et par la suite l'invention de l'imprimerie diffusera amplement l'œuvre de al-Bâtânî qui fut très utilisée par Copernic qui dans le *De Revolutionibus* le cite vingt trois fois.

Figure 3.5 Le sextant de Ulugh Beg construit à Samarkand, Ouzbékistan, XVe siècle. (Wikimedia Commons ; user Alaexis)

L'astronome ibn Yûnus au contraire, qui vit au Caire à la fin du Xe siècle, n'est pas connu en Occident. Il compose un important ouvrage d'astronomie les *Tables Hakimites* qui contiennent une série d'environ cents observations surtout des éclipses et des conjonctions de planètes. Les *tables Tolédanes* préparées au XIe siècle à Tolède en Espagne par l'astronome al-Zarquali (latinisé en Azarquiel) sont traduites en latin et ont une grande diffusion : elles deviennent le modèle dont s'inspirent les *Tables Alphonsines*, destinées à servir de base à toute recherche astronomique depuis le XIVe siècle jusqu'à la Renaissance. Ces « tables » astronomiques sont donc des listes de nombres calculés avec les algorithmes contenus dans l'Almageste de Ptolémée, pouvant donner les positions du Soleil, des planètes et des étoiles, en plus des dates des éclipses. En termes encore plus explicites, elles permettent, jour après jour, de calculer la position de ces astres sur le fond des étoiles fixes. Le calcul des tables est donc le trait caractéristique de l'astronomie médiévale, et cet effort a surtout comme finalité, il ne faut pas l'oublier, de répondre aux exigences de l'astrologie. C'est au fond la même tradition que nous avons déjà observée à propos de l'astronomie babylonienne. Les astronomes islamiques sont plus à l'aise avec les calculs mathématiques des positions des planètes qu'avec l'observation du ciel. Ils ne font pas bien attention par exemple en 1054 à l'apparition d'une supernova dans la constellation du Taureau (*Crab Supernova*), qui est visible en plein jour pendant 23 jours et de nuit pendant 653. Les chroniques chinoises ont de nombreuses références sur elle, mais à ce qu'il semble, elle est mentionnée une seule fois dans les textes arabes.

Thâbit ibn Qurra (836-901), *Tebit* en latin, est un important mathématicien et surtout astronome. En établissant les conditions qui permettent d'individualiser les couples des *nombres aimables*, il donne la démonstration de ce que deviendrait le grand théorème sur ce sujet. En astronomie il souligne les incohérences qui émergent de la confrontation des méthodes géométriques de l'Almageste avec la conception physique du cosmos que Ptolémée a exposée dans ses *Hypothèses planétaires*. Dès le Xe siècle des textes arabes apparaissent régulièrement sur les « doutes », *shukuk*, concernant Ptolémée. Donc bien qu'on ne trouve pas dans la science islamique un penseur révolutionnaire qui défie la cosmologie géocentrique

ptolémaïco-aristotélicienne, il y a une sorte de malaise diffus envers certaines incohérences qui portera ses fruits ensuite dans la Renaissance en Europe.[23] Les critiques concernent surtout l'équant, un artifice de Ptolémée qui amène les planètes à accélérer et ralentir leur mouvement, en opposition évidente avec la philosophie aristotélicienne. Ce sera précisément le problème de l'équant qui poussera Copernic à abandonner le géocentrisme.

Quel est le vrai poids de la science islamique durant l'âge d'or ? C'est une question à laquelle il est difficile de répondre. Si d'une part, il serait tout à fait réducteur d'affirmer que l'importance de la science islamique consiste uniquement en son rôle de préservation et transmission du patrimoine hellénistique à la Renaissance, il est cependant vrai qu'on ne peut éviter de mesurer l'apport des scientifiques musulmans en se basant sur la fécondité des idées qu'ils ont développées qui s'est démontrée par la suite, comme d'autre part cela arrive pour tout scientifique de tout pays et de toute époque. Einstein, pour donner un exemple, est encore bien présent et d'actualité, un siècle après la publication de la Relativité, même si plusieurs incohérences de ses idées n'ont pas probablement été encore bien assimilées. Mais à cause du déclin de la science islamique, tout développement important des idées de penseurs arabes ne pourra se faire que dans le cadre d'une autre culture : la culture « latine » et « européenne ».

Malgré nombre de tentatives de la part des savants, anciens ou modernes, on ne s'accorde pas sur les causes du déclin de la science islamique. Parmi les causes proposées, il y a le conflit entre Sunnites et Chiites et les invasions des croisés et des mongols dans les territoires islamiques entre le XIe et le XIIIe siècle. Les mongols détruisent les bibliothèques, les observatoires astronomiques, les hôpitaux et les universités islamiques. La destruction de Bagdad en 1258, marque traditionnellement la fin de l'âge d'or de l'Islam. On retient que le nombre de scientifiques islamiques commence à décliner à partir du XIIe ou XIIIe siècle, et que ceux-ci deviennent l'exception plus que la règle. Mais récemment la discussion sur le cadre du déclin reprend, soulignant que l'activité dans le domaine astronomique a continué avec une activité créatrice jusqu'au XVIe siècle avec l'œuvre de Ibn al-Shatir (1304-1375) à Damas, celles de Ulugh Beg, Ali Kusçu (1403-1474), al-Birjandi (mort en 1528) et Taqi al-Din (1526-1585). Sur le déclin de la science islamique, l'opinion de George Sarton (1884-1986) est claire ; il est considéré comme le père de l'Histoire des Sciences :

« The decadence of Islam and of Arabic is almost as puzzling in its speed and completeness as their phenomenal rise. Scholars will forever try explain it as they try to explain the decadence and fall of Rome. Such questions are exceedingly complex and it is impossible to answer them in a simple way. »

George Sarton, *The incubation of Western Culture in the Middle East*, A George C. Keiser Foundation Lecture, March 29, 1950, Washington DC, 1951

### **3 | L'astronomie dans l'Europe latine**

Les cinq siècles qui suivirent, de la chute de l'Empire Romain d'Occident à la fin du 1er millénaire, représentent une période où l'activité astronomique a à peu près disparue en Europe. L'Italie, avant les autres ex provinces de l'Empire, sort de la féodalité et s'en va vers l'âge des Communes. C'est ce qui explique pourquoi il n'existe pas un poème épique italien. Alors qu'en Espagne il y a le *Cantar de mio Cid* (1140), en France *la Chanson de Roland* (moitié du XIe siècle) en Allemagne, les *Nibelungenlied* (chanson des Nibelungen, première moitié du XIIIe siècle), en Italie les choses se passent différemment. Pourquoi ? Parce que ces compositions épiques sont l'expression des valeurs de l'époque chevaleresque et féodale, alors qu'en Italie les Communes s'imposent et sont l'expression d'autres milieux sociaux. C'est la société qui émerge de la *Divine Comédie* de Dante Alighieri (1265-1321) qui a assumé la place de poème national et fondateur de la langue vulgaire.

La péninsule italienne par sa situation au centre de la Méditerranée est extrêmement exposée aux invasions par la mer. Les sarrasins, nom que les chroniqueurs médiévaux donnaient aux arabo-musulmans, (peut-être du nom d'une ancienne tribu du Sinaï méridional), organisent de nombreuses incursions sur les côtes de l'Italie méridionale et centrale. La razzia des sarrasins la plus connue culmine par l'assaut, dans la nuit du 24 au 25 août 846, d'Ostie et, une fois remonté le Tibre, le sac qui s'ensuit des basiliques Saint Pierre et Saint Paul qui se trouvent en dehors des fortifications d'Aurélien. C'est la première fois qu'une armée non chrétienne viole le cœur de la chrétienté. Goths, Lombards, Huns et Vandales n'ont en fait jamais profané ce lieu, tout en s'étant lourdement acharnés sur le reste de la ville. C'est un événement qui impressionne énormément toute la chrétienté et incite le pape Léon III à construire grâce à une collecte un nouveau cercle de fortifications, connu sous le nom de Ville Léonine. Quelques années plus tard en 859-860 il y a une autre incursion désastreuse en Italie septentrionale et centrale, cette fois de la part de hongrois venant de Pannonie. A cause du vide absolu de pouvoir à l'époque post-carolingienne naissent de nombreuses initiatives locales et spontanées qui ont comme but la construction de défenses, terre-pleins ou réparations des anciens murs romains. Ces groupes informels de citoyens sont le noyau d'origine des Communes.[21]

Mais les relations entre les cultures ne se font pas toujours sous le signe de la violence. En fait au Xe siècle ont lieu les premiers contacts avec les centres de culture islamiques ; les monastères, sur les pentes des Pyrénées méridionales, deviennent des centres de transmission du savoir arabe. On se rend même en Espagne pour étudier la science des doctes maures. C'est le cas de Gerbert d'Aurillac (env. 950-1003), le futur pape Sylvestre II.[25] En 967 le Comte Borrell de Barcelone visite le monastère où se trouve le jeune Gerbert et l'abbé demande au Comte d'emmener le moine avec lui pour qu'il puisse étudier les mathématiques en Espagne, au monastère de Ripoll. Les années suivantes, Gerbert étudie dans la ville de Barcelone, contrôlée par les chrétiens, entrant ainsi en contact avec le monde islamique, étant donnée la proximité de la frontière. Après son retour Gerbert est appelé à diriger l'école de la cathédrale de Reims qui commence à attirer des étudiants venus de loin, étant donnée que sa renommée d'homme de culture est très grande. Il a peut-être rapporté d'Espagne la connaissance de l'instrument le plus important de l'époque d'avant le télescope : l'*astrolabe*. C'est

un dispositif extrêmement souple qui permet divers emplois et s'acquitte de diverses fonctions. Il permet de prédire la position du Soleil, de la Lune et des étoiles ; il permet de déterminer l'heure locale étant donnée la latitude du lieu et vice-versa, il a des applications géodésiques et permet d'effectuer la triangulation. Ce qui est certain, c'est que l'astrolabe apparaît en Occident avant 1025 et peu de temps après sont composés sur ce sujet, ou adaptés de l'arabe, deux traités latins, œuvres d'un moine allemand, Herman l'estropié (Hermannus Contractus, 1013-1054) le *De mensura astrolabii* et le *De utilitatibus astrolabi*, probablement inspirés du *De compositione astrolabii* de Masha'allh ibn Athari (env.740-815) un astronome et astrologue persan juif. On attribue en outre à Herman la composition de la prière du Salve Regina.[26]

Figure 3-6 Astrolabe, Maroc, XVI<sup>e</sup> siècle. (Paris, Musée Naval) L'astrolabe est un dispositif extrêmement souple qui permet divers usages et assume diverses fonctions astronomiques et géodésiques. Il apparut en Occident avant 1025. (Wikipedia Commons ; user Rama)

Nous avons évoqué le processus qui mena à la formation des Communes italiennes à partir de groupes informels de citoyens qui commencèrent à pourvoir à la réalisation d'ouvrages de défenses contre les incursions. Une exigence ultérieure se présenta, celle de régler les contentieux qu'ils pouvaient créer. Comme les juristes annotent les textes de nombreuses gloses, ils prennent le nom de Glossateurs. La glose n'est rien d'autre que l'éclaircissement élémentaire et immédiat que le professeur apporte à la *litera* du texte juridique durant sa *lecture* devant les étudiants. A Bologne, un certain Pepo ou Pepone, selon un récit du glossateur Odofredo, dans la deuxième moitié du XI<sup>e</sup> siècle, aurait commencé à donner des leçons de droit romain à Bologne, sur son initiative (*de auctoritate sua*). C'est ainsi que naît l'*Ecole bolognaise des Glossateurs* (XII – XIII siècle), école de juristes et de savants qui reconstruisent l'œuvre de Justinien I<sup>er</sup> de Byzance, le *Corpus iuris civilis*, en font une analyse approfondie, en redécouvrant et en réinterprétant les textes classiques. Les étudiants accourent désireux d'écouter le maître qui « révèle » ces textes mystérieux, oubliés depuis des siècles, mortifiés et avilis par la culture du haut moyen âge. Provenant de toute l'Europe, ils viennent spontanément à Bologne, désireux de pouvoir assister aux *lecturae* des professeurs. Les *scholares* choisissent et financent eux-mêmes les enseignants. Ils s'organisent en collèges, s'entraîdant entre camarades de même nationalité, les *nationes*, divisées en *intramontains* (ou *citramontains*) et *ultramontains*. Déjà au XII<sup>e</sup> siècle il y a bien 17 *subnationes* ultramontaines, parmi lesquelles les nations des Lombards, Toscans, Romains et Campaniens et 14 ultramontaines, c'est-à-dire les nations européennes. A Bologne la *nation germanique* joue un rôle prééminent. L'union des différentes nations sera à l'origine de l'*université*.

Ainsi naît la première université de l'histoire : c'est justement l'étude du droit à Bologne, organisée sur des bases systématiques qui donne vie à une structure stable, dotée de bureaux, magistratures, statuts, née grâce à l'association spontanée des *scholares*. Les historiens sont d'accord pour fixer l'année de sa fondation en 1088. En 1158 Frédéric II promulgue la *Constitutio Habita* (ou *Authentica Habita*)

par laquelle l'université est protégée en tant que lieu de recherche et d'étude indépendamment de tout autre pouvoir. Ce processus de fondation des *universitas* se répétera rapidement ailleurs : à Oxford en Angleterre, autour de 1096, au XIe siècle à Parme, à Paris en 1150. A cette époque-là, au XIe et XIIe siècle, les auteurs latins sont comme Hermannus Contractus ou traducteurs ou fortement redevables envers la littérature astronomique arabe. [22] C'est le cas d'un autre personnage notoire : Adélard de Bath (1080-1152) . Ce savant anglais est traducteur, philosophe et mathématicien. Au début il étudie au monastère bénédictin où il devient moine, puis à partir de 1100 il part en France, à Tours, où il s'adonne aux arts du trivium et du quadrivium. Il fait de nombreux voyages, parmi lesquels Salerne, Syracuse, la Grèce, Tolède et Antioche. Il traduit les tables astronomiques de al-Khwarizmi. Bien que les Eléments d'Euclide aient été étudiés dans l'Empire Byzantin dans l'original grec, le texte a été perdu dans l'Europe latine jusqu'à ce que Adelard en fasse autour de 1120 une traduction de l'arabe, qui devient le texte le plus autorisé dans les écoles de mathématique européennes. On rappelle Adélard par une de ses phrases célèbre : « *Si tu veux que je t'écoute, donne et acceptes des raisons* »

Figure 3.7 Des étudiants entrent dans la « *Natio germanica Bononiae* ». On peut lire la date « 1497 ». En 1496 Copernic se rend en Italie pour étudier le droit à Bologne où il est enregistré dans la Nation allemande en tant que « *Nicolaus Koperlingk de Thorn* ». Wikimedia Commons ; user Stefan Bernd)

Les premières traductions en latin d'œuvres grecques de caractère scientifique remontent donc au XIIe siècle. Bernard de Chartres au début du siècle résume ce lien avec les « Anciens » en une formule destinée à avoir un grand succès : « *Les nains placés sur les épaules des géants voient plus que les géants eux-mêmes* ». Il est clair que parmi les thèses des anciens « Géants » ne sont pas rapportées celles qui plus tard seront considérées comme l'expression de toute l'antiquité c'est-à-dire, les doctrines aristotéliennes. Par exemple le philosophe scolastique Guillaume de Conches (env. 1080-1154), dans son *Dragmaticon philosophiae*, écrit autour de 1140, rapporte l'opinion selon laquelle les étoiles fixes sont dotées d'un *mouvement propre* même s'il est trop lent pour être observé pendant la durée d'une vie humaine et que le Soleil est doté d'une force attractive. L'idée que les étoiles ont un mouvement intrinsèque remonte à Hipparque et sera confirmée en 1718 par Edmond Halley (1656-1742).

La chute entre les mains des latins, en 1085, de Tolède, un des principaux centres culturels islamiques, est un événement décisif pour la diffusion de la science grecque dans l'occident latin. Gérard de Crémone (env. 1114-1187) est un important traducteur qui se rend dans cette ville. On suppose qu'il a traduit au moins 74 ouvrages de l'arabe, en grande partie des recherches scientifiques d'hommes de sciences et savants musulmans comme al-Farghani, Jâbir ibn Aflah (Geber), al-Nayrisi (Anaritius), al-Hazen, Rabi' ibn Zayd, al Khwârizmî, Muhammad ibn Zakariya al-Râzi (Rhazes) et Abu al-Qasim al-Zahrawi (Albucasis). On attribue à Gérard la traduction d'autres œuvres parmi lesquelles les règles (*Canones*) pour l'usage des Tables Tolédanes de al-Zarqali. La traduction en

latin effectuée par Gérard de Crémone de l'Almageste de Ptolémée est l'unique version connue en Europe occidentale pendant plusieurs siècles, jusqu'à ce que d'abord, l'humaniste byzantin Georges de Trébizonde (1395-1472) et puis Regiomontanus (Johannes Müller, 1436-1476) traduisent le texte original grec au XVe siècle. Une autre circonstance importante favorise la dispersion des manuscrits conservés à Byzance : le sac de la ville en 1204 durant la quatrième croisade et la fondation ensuite de l'Empire Latin (1204-1261).[9]

Il faut bien comprendre quel impact peuvent avoir les traductions des œuvres hellénistiques et du moyen âge islamique sur les universités européennes naissantes du XIIe siècle. Quand les enseignants du *Quadrivium* ont entre les mains l'Almageste pour la première fois, cela doit leur apparaître comme quelque chose d'absolument inaccessible, d'une complexité beaucoup plus grande que celle de tout autre ouvrage d'astronomie qu'ils connaissent déjà. En outre, les manuscrits quand ils sont disponibles, ont un coût prohibitif et sont soumis aux erreurs des copistes. Il faut dire que parmi les missions de l'université la recherche n'est pas perçue comme le développement de connaissances, mais comme l'étude de textes d'une qualité reconnue qui, en général, a pour but d'exercer de manière intensive les capacités de raisonnement logique. L'étudiant en astronomie n'est certes pas un astronome mathématicien, et l'étude du ciel ne comprend pas l'observation. [22]

L'effort des traducteurs a cependant un succès immédiat car il met en évidence la grande médiocrité des manuscrits d'initiation à l'astronomie utilisés jusqu'alors dans l'enseignement. Johannes de Sacrobosco (Jean de Holywood env. 1295-1256) remédie à cette situation ; étudiant anglais, il enseigne à l'université de Paris qui devient très vite le centre intellectuel de la chrétienté. En fait c'est justement à Paris que le dominicain italien Thomas d'Aquin (1225-1274) fait une synthèse entre l'aristotélisme païen et la vision chrétienne élaborée au cours des mille dernières années. Sacrobosco enseigne aux étudiants trois œuvres qui répondent aux nouvelles exigences dans l'ensemble. Il s'agit du *Compotus*, une introduction au calcul du temps, d'*Algorismus* qui enseigne l'arithmétique du calcul astronomique et enfin le *Tractatus de Sphaera*, son œuvre la plus célèbre, connue aussi sous le nom de *Sphaera* qui est étudiée par les étudiants de toutes les universités d'Europe latine pendant les quatre siècles suivants.

### **Le rasoir d'Ockham**

*Le rasoir d'Ockham* est un principe méthodologique exprimé au XIVe siècle par le philosophe et frère franciscain anglais William d'Ockham (1288-1349). Il suggère comment, parmi les diverses explications d'un phénomène naturel, on doit donner la préférence à celle qui n'introduit pas de faits inutiles. On pourrait reformuler l'idée en affirmant que *à parité de facteurs il est plus plausible que l'explication exacte soit celle qui est la plus simple*. Le principe, à la base de la pensée scientifique moderne, dans sa forme la plus simple, suggère l'inutilité de formuler plus d'acceptations que celles étroitement nécessaires pour expliquer un phénomène donné : « *Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem* » (Ne multiplie pas les éléments plus que nécessaire)

Le manuscrit est copié plusieurs fois avant l'invention de l'imprimerie. Une centaine de copies sont même parvenues jusqu'à nous. La première copie imprimée apparaît à Ferrare en 1472, dès lors paraissent pendant les deux siècles suivants, environ 90 éditions avec de nombreux commentaires, parmi lesquels le plus célèbre, celui de l'astronome jésuite Christophe Clavius (1538-1612) dont le titre est *In sphaeram Iohannis de Sacro Bosco commentarius* (Roma, 1581).

Mais même le traité de Sacrobosco montra rapidement ses limites ; surtout le Livre IV ; il traite le problème du mouvement du Soleil, de la Lune et des planètes en plus d'une description sommaire des éclipses et se montre tout à fait insuffisant. On a besoin de quelque chose de mieux et pour combler la lacune on publie la *Theorica planetarum*, œuvre du mathématicien et astronome italien Giovanni Campano (1220-1296), mathématicien et scientifique parmi les plus importants du XIII<sup>e</sup> siècle, cité aussi par Roger Bacon (1214-1294) comme un des plus grands mathématiciens contemporains. Dans la *Theorica Planetarum*, Campano décrit géométriquement les mouvements des planètes et la manière de réaliser un planétarium. C'est la première description d'un pareil mécanisme de la part d'un européen. Les données sur les planètes sont tirées de l'Almageste et des Tables Tolédanes.[22]

La description minutieuse du planétarium reste un projet sur papier pendant près d'un siècle jusqu'à ce qu'il tombe entre les mains de l'horloger italien Giovanni Dondi dall'Orologio (env. 1330-1388). Celui-ci réalise l'*Astrarium*, une machine géniale qui s'inspire directement de la *Theorica planetarum* ; elle est complétée autour de 1364. Il s'agit du premier dispositif comparable à la machine d'Anticythère. L'horloge astronomique (ou *astrarium*) de Dondi a été détruite, mais elle est bien connue parce que son auteur en a donné une description détaillée dans son *Tractatus Astrarii*, transmis par deux manuscrits. Elle consiste en un mécanisme mû par des poids, de petites dimensions (haut d'environ 85 cm, large d'environ 70 cm) contenu dans une enveloppe à base heptagonale. Grâce à une série d'engrenages, l'*astrarium* reproduit les mouvements du Soleil, de la Lune et des cinq planètes. Il indique aussi la durée des heures de lumière à la latitude de Padoue. Comme mesureur de temps, en plus de l'heure, il indique aussi peut-être pour la première fois dans les horloges mécaniques, les minutes par groupes de dix.

Dondi est frappé par la *Theorica Planetarum* de Campano, et affirme se fier à sa méthode scientifique. Voici ce qu'écrivit Dondi dans la préface de son *Tractatus Astrarii*, le livre-manuel pour construire l'*Astrarium* :

« *L'idée m'est venue de réaliser cette œuvre [ l'Astrarium ] d'une subtile intuition de Campano, là où dans sa Theorica Planetarum il parle d'instruments d'équation. J'ai constaté qu'il a bien calculé les extensions des orbites et les distances des centres [ des planètes ] et, sans me soucier d'approfondir davantage, j'ai fait confiance à la précision de sa recherche et de son génie* »

Texte latin tiré du manuscrit conservé à la Biblioteca Capitolare de Padoue [ D.39- f.1rB (#5) ] [27]

En 1381 Dondi présente son horloge au duc Gian Galeazzo Visconti qui l'installe dans la bibliothèque de son château à Pavie. Elle reste là, au moins jusqu'en 1485 ; il est possible que là, elle ait été étudiée par Léonard de Vinci (1452-1519). Regiomontanus vient la voir en 1462 et rapporte que des prélats et

des princes allaient l'admirer comme si c'était un miracle. Et puis on perd la trace de l'Astrarium. L'horloge astronomique qu'on peut admirer maintenant sur la Tour de l'Horloge de Padoue, Place des Signori, est une copie non de l'Astrarium de Giovanni Dondi, mais de l'horloge construite en 1344 par son père, Jacopo Dondi (env.1293-1359).

Homme de vastes intérêts, Jacopo a, en outre, joué un rôle d'un certain poids dans le lourd et complexe chemin vers la compréhension du phénomène des marées. Il est en fait l'auteur d'un bref manuscrit *De fluxu et refluxu maris*, où est décrite une théorie des marées, substantiellement correcte qui met en cause aussi bien la Lune que le Soleil.[5] Dans son œuvre Dondi explique les variations des marées au long du cycle lunaire par la diverse combinaison des actions du Soleil et de la Lune. Tous deux tendent à élever le niveau des eaux dans sa propre direction et dans celle opposée.

Figure 3-8 Dessin du mécanisme d'échappement de l'Astrarium de Giovanni de Dondi. Du *Tractatus Astrarii*, de Dondi, 1364. (*Tractatus Astrarii* in MS 631, Biblioteca Civica, Padoue, folio 13r.) (Wikimedia Commons ; user Chetvorno)

*La théorie luni-solaire* est complètement différente des explications, souvent fantaisistes, qui circulent durant ces siècles. Par exemple parmi les différentes théories médiévales on peut rappeler celle de la chaleur lunaire. L'idée est que à la lumière de la Lune soit associée une petite émission de chaleur capable de dilater les eaux. Cela pourrait être une hypothèse raisonnable, mais elle se heurte immédiatement à la constatation que la lumière solaire aurait un effet énormément plus important ; et pourtant on continue encore à la soutenir au XVI<sup>e</sup> siècle. Même Dante fait allusion à une action (gravitationnelle ?) de la Lune sur les masses marines :

« *L'eau semble suivre surtout le mouvement de la Lune, comme il apparaît dans le flux et le reflux de la mer ; l'orbe lunaire étant donc excentrique, il semble raisonnable que l'eau dans sa sphère imite l'excentricité de celui-ci [...]* » Dante Alighieri, *Quaestio de Aqua et Terra*, VII [28]

Jacopo Dondi écrit un important ouvrage de pharmacologie, l'*Aggregator medicamentorum*, seu de *medicinis simplicibus*, écrit en 1355 ; plus d'un siècle après, en 1470, on le juge d'une telle utilité qu'il est imprimé et même réédité au XVI<sup>e</sup> siècle. Il n'y a pas de doutes sur le fait que Jacopo, auteur aussi d'un ouvrage de caractère philologique dont nous savons peu de choses, ait été un homme de vastes lectures. L'œuvre de Iacopo sur le flux et le reflux de la mer, composée autour de 1355, a été longtemps considérée comme perdue. L'édition de Revelli de 1912 basée sur une copie effectuée au XVI<sup>e</sup> siècle est maintenant conservée dans la Biblioteca Ambrosiana de Milan, où elle a été maintes fois redécouverte et oubliée. Lucio Russo en 2003 a publié une étude fondamentale sur les origines de la théorie luni-solaire ; il a porté à l'attention des historiens le manuscrit de Dondi et sa filiation avec la tradition hellénistique, en particulier avec les études de Séleucos de Babylone [5]

L'opuscule de Dondi, 17 feuilles dans le manuscrit qui nous est resté, est divisé en 4 chapitres. Le cadre général est celui d'une organisation logique rigoureuse.[29] Comme dans les œuvres plus tard de deux intellectuels vénitiens, Federico Crisogono (1472-1538) auteur du *Tractatus de occulta causa fluxus et refluxus maris* et Marc' Antonio de Dominis (1560-1624), auteur de *Euripus, seu de flusu et refluxu maris sententia* de 1624, dans l'œuvre de Dondi les marées sont clairement attribuées aux actions de la Lune et du Soleil. Il y explique comment deux effets s'ajoutent dans les conjonctions et les oppositions et se soustraient l'un l'autre durant les quadratures. L'hypothèse fondamentale de *la théorie luni-solaire* proposée par les trois auteurs vénitiens est que la Lune et le Soleil attirent les eaux vers eux et vers le point diamétralement opposé. Il semblerait que les œuvres de Dondi, Crisogono et de Dominis représentent en réalité une partie d'une tradition plus ancienne et complexe avec des traces présentes dans l'ambiance vénitienne, surtout padouane. La théorie luni-solaire réapparaît en Europe sur le territoire de la République de Venise, c'est-à-dire dans l'état qui exerce la fonction historique de médiateur culturel entre l'Empire Byzantin et l'Occident. Jadis ancienne province de l'Italie byzantine, le Duché de Venise s'est progressivement libéré du contrôle impérial, devenant de fait un état indépendant qui, en l'an 1000, cherche à imposer sa propre hégémonie sur la Mer Adriatique. Les privilèges obtenus de l'Empire Byzantin au cours des siècles ont en fait donné à la ville le monopole sur de nombreux marchés d'Orient et elle est le principal acteur du commerce dans cette région. La Chrysobulle de 1082 qui émane de l'empereur Alexis Ier Comnène, concède de très grands privilèges commerciaux au Duché de Venise. Dans l'édit, Alexis concède surtout des maisons, magasins, boutiques et môle dans la ville de Constantinople, dans le quartier de Pera. En outre il concède aux vénitiens le droit de libre commerce et la totale exemption de droits dans la capitale de l'empire et dans d'autres villes situées surtout dans les îles de l'Egée et les Balkans, excluant seulement la Mer Noire des zones d'exonération. Par un tel acte l'empereur fait du Duché vénitien la principale référence commerciale de l'Empire d'Orient ; il jette les bases de la prospérité de Venise et augmente remarquablement le nombre, la qualité et la richesse des échanges commerciaux byzantins, mais en même temps, il noue un lien tellement étroit avec son ex-province qu'il finit avec le temps par devenir étouffant pour Byzance et par provoquer la réaction du nouveau Basileus Jean II.

Il ne faut donc pas s'étonner que de nombreux manuscrits byzantins soient découverts à Venise. Bien que nous ne puissions pas documenter continûment toute la tradition intermédiaire, il est difficile de douter de l'existence d'un fil continu qui, de la période hellénistique, à travers les époques impériale et byzantine, a transmis les connaissances antiques (et correctes) jusqu'à Jacopo Dondi et aux autres représentants de la tradition vénitienne. La théorie luni-solaire vécut longtemps, se transmettant d'un auteur à un autre, servant de sujet de cours dans une université de prestige comme Padoue et des livres, publiés dans divers pays européens, sans réussir à prévaloir sur les explications typiquement médiévales, ni à être prise sérieusement en considération par les plus grands scientifiques du début des temps modernes. Descartes ne semble pas en avoir connaissance, Galilée la réfute comme un résidu de la pensée magique, Stevin tente d'élaborer une théorie rigoureuse des marées en se limitant à un modèle élémentaire purement lunaire. Il faut rappeler que l'œuvre la plus célèbre de Galilée, le Dialogue sur les deux plus

grands systèmes du monde, ptolémaïque et copernicien (1632), n'est pas seulement écrit pour défendre le système copernicien, mais est surtout un travail qui veut exposer une théorie sur les marées, complètement fautive parce que basée sur le mouvement de la Terre diurne et annuel. Galilée réfute l'idée, acceptée par la majorité de ses contemporains, que la Lune a une action directe sur les eaux.[5]

Jusqu'à maintenant on n'a pas étudié attentivement l'arrière-plan des théories qui ont précédé et préparé la systématisation finale opérée par Isaac Newton incluse dans le *Philosophie naturalis principia mathematica* de 1687. Parmi les historiens de la science s'est imposée la conviction que toutes les idées sur les marées précédant le traité de Newton doivent lui être nécessairement étrangères.

C'est en dehors de la tradition latine médiévale que l'on situe Levi ben Gerson (1288-1344) appelé aussi Gersonide, un astronome hébreu qui vit en France à Orange, pas loin d'Avignon.[30] Ses recherches s'éloignent de plusieurs façons de la ligne de l'astronomie médiévale. Son texte d'astronomie a été traduit de l'hébreu en latin par Pierre d'Alexandrie (ville de l'Italie du Nord) en collaboration, semble-t-il avec Gerson lui-même. Cependant la majeure partie des œuvres de Levi ben Gerson ne sont disponibles qu'en hébreu et il n'est pas surprenant donc que son influence soit limitée. On lui attribue l'invention du *Baton de Jacob* un instrument de mesure en forme de croix qui est utilisé au Moyen Age pour des mesures nautiques et astronomiques. L'instrument est décrit dans son ouvrage en hébreu « Guerres du Seigneur » (MilHamot Adonai). Il faut cependant attribuer cette invention à un autre astronome hébreu, Jacob ben Makir (env.1236-1304) quelquefois latinisé en *Profatius Judaeus*, qui a vécu lui aussi en Provence à la même époque. Gerson s'intéresse aux instruments d'observation et en cela il rompt avec la tradition ; il affirme plusieurs fois que la théorie astronomique doit être basée sur des données d'observation. En plus de ses recherches sur les positions des planètes, inclus le Soleil et la Lune, intérêt qu'il partage avec d'autres astronomes du Moyen Age, nous trouvons Gerson occupé à des recherches sur les caractéristiques physiques des planètes telle la luminosité. Ces mesurages suscitent beaucoup moins d'intérêt de la part des astronomes médiévaux. Ptolémée dans *les Hypothèses planétaires* a assigné des dimensions apparentes aux planètes, mais ne s'est pas servi de ces données pour construire ses modèles.[31] Pour ben Gerson, au contraire, « les dimensions » (c'est-à-dire les luminosités apparentes) sont des données qu'une théorie astronomique doit expliquer. Parmi les instruments dont il se sert, il y a la *chambre obscure* avec laquelle l'astronome hébreu mesure en 1334 les dimensions apparentes du Soleil à l'apogée et au périhélie ; de ces variations dérive une valeur pour l'excentricité solaire. La dérivation de cette donnée à partir de l'observation directe du diamètre apparent du Soleil, à la différence de Ptolémée qui fait dériver l'excentricité de la variation de la longueur des saisons, convainc Gerson de la réalité des variations de distance de la Terre depuis le Soleil. La chambre obscure, inconnue de Ptolémée, a été décrite par l'astronome islamique Ibn al-Haytham (*Alhacen*, 965-env.1039) connu pour ses contributions à l'optique.

La première œuvre d'astronomie de haut vol rédigée dans l'Europe chrétienne sont en 1252, les *Tables Alphonsines* qui rapidement remplacent les anciennes *Tables Tolédanes*, rédigées par les astronomes arabes.[22] La compilation des tables est organisée par le roi Alphonse X de Castille et Léon et effectuée à Tolède autour de 1252 par une cinquantaine d'astronomes. Des

analyses modernes sur ordinateur ont démontré qu'elles sont calculées en adoptant les modèles de Ptolémée des mouvements planétaires, avec des paramètres seulement occasionnellement modifiés. Ces tables prennent une grande importance dans l'histoire de l'astronomie et dans l'histoire des découvertes géographiques. En fait elles sont largement utilisées directement ou dans des versions soumises à révisions, par les grands navigateurs du XVe siècle et du XVIe siècle. Christophe Colomb en particulier base ses projets de navigation océanique sur une de leur révision faite par Abraham Zacuto (1452-1515), astronome hébreu espagnol qui s'est formé à l'université de Salamanque et qui fournit une importante contribution à la navigation portugaise. Les Tables ont été éditées et imprimées à Venise en 1483.

Figure 3.9 *Tabelas alfonsinas, El Libro del Saber de Astronomia*. (Le livre de la connaissance astronomique). Les Tables alphonsines sont des tables astronomiques capables de donner les positions du Soleil, des planètes, des étoiles et des éclipses. La compilation des Tables a été organisée par Alphonse X roi de Castille et de Léon, dit « el Sabio » (le Sage). Elles furent rédigées à Tolède autour de 1252 par une cinquantaine d'astronomes. (Wikimedia Commons ; user Elvenbyte)

A côté de ces développements de l'astronomie pratique et expérimentale, il y a d'importantes réflexions sur des aspects plus théoriques. Ce sont souvent l'œuvre des savants parisiens de la *Tarda Scolastica* (XIVe-XVe siècle), en particulier Jean Buridan (env.1295-1328) et Nicolas Oresme (env.1320-1382). Le problème pourrait être formulé de la manière suivante. Si la Terre est fixe au centre de l'univers, il faut admettre que les sphères des planètes et celle des étoiles fixes, qui se trouve à grande distance, tournent autour de la Terre en 24 heures pour rendre compte du mouvement diurne du Soleil, de la Lune, des planètes et des étoiles. Tout compte fait, cela paraît plutôt invraisemblable, alors qu'il serait beaucoup plus raisonnable d'admettre que oui la terre est au centre de l'univers, mais que le mouvement diurne est en réalité un mouvement de rotation de notre planète sur son axe. Mais quels étaient les arguments contre cette hypothèse qui attribue à la Terre un mouvement de rotation ? Il faut surtout invoquer des arguments de balistique comme le lancer de flèches et non des arguments d'astronomie. Si nous considérons le lancer d'une flèche en l'air, à condition qu'il n'y ait pas de vent, elle retombe à l'endroit où elle a été décochée. Aristote avait soutenu que cette observation démontrait que la Terre est fixe et ne bouge pas durant le vol de la flèche. Il avait mis sur pieds une théorie des mouvements des projectiles en imaginant que l'air agité faisait naître une poussée capable d'en prolonger le mouvement même après l'interruption du contact avec le propulseur, dans le cas de la flèche, l'arc. Il ne semble pas qu'il ait été très satisfait de cette solution puisqu'il en donna au moins deux versions incompatibles et sur cette question, il fut toujours dans le doute. [32]

Les maîtres parisiens du XIVe siècle ne sont pas les premiers à montrer l'absurdité de cette explication : si cela se passe vraiment comme le dit Aristote, comment serait-il possible de décocher une flèche à contrevent ? Oresme et

Buridan reprennent alors une idée déjà présente chez Giovanni Filipono au VI<sup>e</sup> siècle, un penseur de la « renaissance byzantine ».[9] Selon cette théorie, l'archer imprime une force motrice qu'ils appellent *impetus*. Donc Oresme déclare que si la Terre se déplace en même temps que l'archer, une flèche lancée en l'air partagerait avec elle son mouvement latéral et retomberait à son point de départ. Si les choses sont en ces termes et la théorie de l'impetus valide, il n'est pas possible alors de démontrer si la terre se déplace ou pas, simplement en lançant des flèches en l'air. L'impetus est la première formulation du *principe d'inertie*. La récupération de ce thème qu'on peut vraisemblablement attribuer à Hipparque, démontre combien on commence à s'éloigner de la pensée d'Aristote. A ce sujet il est important de rappeler une affirmation de Héron (*Mechanica*, 1, iv, 20) relative aux corps qui se trouvent sur un plan horizontal et privé de frottement : « *Nous démontrerons que les poids qui ont une telle position peuvent être mûs par une force plus petite qu'une quelconque force donnée.* »

La démonstration de Héron, obtenue en considérant le plan horizontal comme cas limite d'un plan incliné avec une inclinaison tendance zéro, sera reproposée par Galilée dans ses *Discorsi*. [9]

Si le XII<sup>e</sup> siècle est celui des traductions et le XIII<sup>e</sup> siècle celui de l'assimilation, on peut maintenant à aller au-delà de la tradition transmise par l'époque impériale et il est possible de rétablir les premiers ponts avec la pensée scientifique de l'âge d'or de l'hellénisme, le III<sup>e</sup> siècle av. J.-C. Il est possible de reconstruire l'astronomie planétaire de Ptolémée. C'est une opération tout sauf banale du moment que dans l'Almageste il n'y a pas d'indications pour élaborer l'algorithme dont est décrit l'emploi. Il est significatif que Copernic pour compléter ce projet devra choisir l'hypothèse héliocentrique d'Aristarque.

#### 4 | Astronomie indienne

Si en Occident l'histoire de l'astronomie peut être approximativement identifiée avec le lent processus de récupération des connaissances hellénistiques, ailleurs l'histoire des idées de l'astronomie suit des parcours différents. Observons comment les concepts passent d'une culture à l'autre pour prendre ensuite une voie opposée, enrichis de nouvelles contributions. C'est le cas de l'Inde qui a été influencée par les cultures babylonienne et hellénistiques, mais a ensuite donné des connaissances mathématiques qui font partie de notre bagage culturel à nous tous. : parmi celles-ci il y a, sans aucun doute, le *zéro*. Le savant indien Pingala, qui vit entre le IV<sup>e</sup> et le II<sup>e</sup> siècle av. J.-C. et ses contemporains, emploient le terme sanscrit *sunya* (vide) pour se référer au zéro. Le symbole moderne 0 tire vraiment son origine de l'image du vide ou de lacune. Pingala décrit le premier, en outre, un système de nombres binaires en relation avec les syllabes courtes et longues : une sorte de code Morse. Le concept de zéro comme nombre et non seulement comme un symbole de séparation doit être attribué aux mathématiciens indiens qui, à partir du IX<sup>e</sup> siècle ap. J.-C., effectuent des calculs pratiques en utilisant le zéro qu'ils utilisent comme n'importe quel autre nombre. Au début l'astronomie en Inde, comme dans beaucoup d'autres cultures, est profondément liée aux croyances

religieuses. La première référence textuelle aux concepts d'astronomie provient des *Veda*, les textes sacrés indiens. On y trouve, et surtout dans le *Rigveda*, des considérations sur la genèse de l'univers tiré de la non existence, la sphéricité de la Terre et l'année de 360 jours divisée en 12 parties de 30 jours chacune, avec un mois intercalaire périodique. Les directions cardinales se trouvent dans le *Sulbasutra* du Ier millénaire av. J.-C., traité qui contient des applications mathématiques utilisées pour la construction des autels ; et puis on utilise la mathématique et quelques instruments d'astronomie pour calculer la durée du jour et le lever et le coucher du Soleil.

Durant la période qui va du IV<sup>e</sup> au III<sup>e</sup> siècle av. J.-C. l'astronomie indienne introduit les méthodes mésopotamiennes de la période Achéménide à travers l'Iran. Le *Jyotisa Vedanga*, rédigé par Lagadha, remonte à cette période et contient un calendrier luni-solaire qui adopte comme unité de temps 1/30 de mois synodique (= 1 *tithi*).[33] Deux fragments de tablettes cunéiformes provenant de Uruk, actuellement conservées au musée archéologique d'Istanbul, montrent le même concept de mois lunaire moyen de 30 jours subdivisé en 30 unités de temps égales. On retrouve encore cette subdivision dans la théorie lunaire et planétaire babylonienne de la période séleucide III<sup>e</sup> /I<sup>e</sup> av. J.-C. Les premiers *Veda* et *Brahamanas* contiennent des listes de 27 ou 28 constellations ou *naksatras* associées aux mouvements de la Lune, en plus de paramètres approximatifs, comme les 12 mois et les 360 « jours » de l'année ou *nychthemera*. Il semble que les mesures du temps soient faites au moyen d'horloges à eau cylindrique et moyennant un gnomon ; en outre des règles sont spécifiées pour la quantité d'eau qui doit être mise dans le cylindre aux différents moments de l'année. La référence à cette horloge à eau, avec d'autres indications, amène les savants à relier le *Jyotisa Vedanga* et le groupe de textes qui lui sont associés, aux quelques textes cunéiformes parmi les premiers connus de nature astronomiques comme *mul Apin* (687 av. J.-C.) ; le gnomon, essentiellement une méridienne, est utilisé par les astronomes babyloniens pour mesurer la variabilité de la longueur du jour, et on relève les longueurs des ombres projetées à midi durant l'année. Le fait qu'ait été adopté en Inde le rapport de 3:2 pour la longueur du jour aux solstices d'été et d'hiver, bien qu'il se réfère rigoureusement à une latitude de 35°, donc au nord de Babylone, pourrait être interprété comme une indication de l'influence et de l'autorité de l'astronomie mésopotamienne de l'époque. Pendant que Lagadha n'affronte que des problèmes de calendrier relatifs aux années solaires, des mois synodiques, des heures de lumière diurne et le mouvement moyen du Soleil et de la Lune moyennant les *naksatras*, les astrologues s'intéressent aux mouvements des planètes. Ils croient en fait que le Soleil, Jupiter et Vénus coopèrent pour stimuler la croissance des plantes et c'est pour cette raison, c'est-à-dire l'étude de ces supposées « influences » des planètes, qu'ils doivent prévoir les rétrogradations, les transits et les conjonctions avec les constellations. Les astronomes indiens de cette période opèrent seulement avec les mouvements moyens ; le temps requis par le Soleil moyen pour faire une révolution complète dans les ciels est défini comme une année *saura* ou 12 mois *saura*. L'intervalle de temps entre deux conjonctions successives entre Soleil et Lune, ou entre deux lunes nouvelles, est défini comme mois lunaire, ou 1 *tithi* = 1/30 du mois lunaire est un jour lunaire. Comme 12 mois lunaires sont équivalents à 354 jours, en quelques années on doit ajouter le mois intercalaire supplémentaire pour obtenir que l'année *saura*, qui commence avec

l'entrée du Soleil dans la constellation du Bélier, n'aïlle pas « hors phase » avec l'année luni-solaire qui commence au contraire avec la conjonction (ou lune nouvelle) qui précède immédiatement l'événement. Une autre indication de l'influence babylonienne sur l'astronomie indienne est l'identité des périodes sidérales de révolution de Jupiter, Saturne et Vénus et la longueur du mois lunaire anomalistique dans le *Pancha Siddhanta* de Vaharamihira (VI<sup>e</sup> siècle ap. J.-C.) avec des valeurs trouvées sur des tablettes cunéiformes de la période séleucide. Cet antique traité indien est donc une source utile d'informations sur l'astronomie babylonienne parce qu'il contient d'autres paramètres concernant les planètes non retrouvés dans les textes cunéiformes. Les traités *Paulisa* et *Romaka Siddhantas*, comme le suggèrent leurs noms, littéralement « Doctrine de Paul » de Paul d'Alexandrie, astrologue du IV<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. et « Doctrine des romains » font partie d'une tradition astrologique qui, partant de l'Égypte hellénistique, à une époque où désormais la science de l'âge d'or est contaminée par des éléments ésotériques, arrive en Inde et ensuite en Europe occidentale. Ils sont probablement basés sur des traductions du grec du IV<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. Le *Paulisa Siddhanta* est le premier traité qui introduit la notion de *sinus*, reconnue comme venant d'Hipparque. Une autre preuve de l'influence d'Hipparque sur l'astronomie indienne est l'emploi dans le *Paulisa* des latitudes et longitudes « polaires » et l'adoption de son étrange terminologie pour exprimer des arcs de longueur sur un cercle quelconque en termes de constellations du zodiaque.[33] La latitude polaire est la mesure de la distance d'un corps céleste depuis l'écliptique le long du méridien qui passe à travers lui, tandis que la longitude polaire est la longitude du point d'intersection entre ce méridien et l'écliptique. Cette méthode est adoptée dans les textes sanscrits pour résoudre les problèmes de la visibilité et de la conjonction des planètes et des étoiles.[33]

En 476 ap. J.-C. la même année où Odoacre devient roi à la place du dernier empereur romain d'Occident, naît en Inde Aryabhata (476-550 ap. J.-C.) le plus important astronome mathématicien de l'âge classique indien.[34] Les études historiques sur Aryabhata commencent en 1874 quand H. Kern le premier, publia le texte sanscrit de l'unique traité existant, *Aryabhatiya*. Ses œuvres les plus importantes sont l'*Aryabhatiya* de 499, un nom attribué par les commentateurs qui suivirent, écrit quand il a 23 ans, et *Aryasiddhanta*. *Aryabhatiya* est un précis de mathématique et d'astronomie auquel on se réfère souvent dans la littérature mathématique indienne. Les parties inhérentes à la mathématique concernent l'arithmétique, l'algèbre, la trigonométrie plane et sphérique, en plus des fractions, équations quadratiques, somme des séries de puissances et tables des sinus. Il est inévitable de faire une comparaison avec les connaissances élémentaires en mathématique que Boèce dans ces années-là tente de sauver en Occident. *Aryasiddhanta* est un ouvrage sur les calculs astronomiques qui ne nous est pas parvenu, mais que nous connaissons à travers les écrits de Varahamihira (505-587 ap. J.-C.), un contemporain de Aryabhata, et par l'intermédiaire des mathématiciens et commentateurs qui suivirent parmi lesquels Brahmagupta et Bhaskara I. Ce traité semble se baser sur le précédent *Surya Siddhanta* ; il contient une description des divers instruments d'astronomie, entre autre le gnomon, quelques instruments pour mesurer les angles et des horloges à eau. Un troisième ouvrage qui pourrait avoir survécu dans une traduction arabe est *Al ntf* (ou *Al-nanf*). Dans le texte qui est arrivé jusqu'à nous, on soutient qu'il s'agit d'une

traduction d'un ouvrage de Aryabhata, mais le nom sanscrit de ce travail n'est pas connu ; l'œuvre remonte probablement au IXe siècle ap. J.-C. ; elle est citée par le savant persan Abu Rayhan al-Biruni. La période où vécut Aryabhata coïncide avec le règne de Buddhagupta (477-497 ap. J.-C.) le dernier grand souverain de la dynastie Gupta, âge d'or de l'antique science indienne. *Aryabhatiya* est un précis de mathématique et d'astronomie écrit dans un style extrêmement dense ; il est composé de 123 vers (*sutras*) divisés en quatre chapitres ; le chapitre relatif à la mathématique (*Ganita*) est constitué de 33 vers et bien que cette partie de l'œuvre ne soit pas une exposition systématique et exhaustive de la mathématique de son temps, il exerça cependant une grande influence non seulement sur le développement de la mathématique en Inde mais aussi à travers les Arabes comme intermédiaires, sur la mathématique européenne naissante.[33] Le mathématicien arabe al-Khwarizmi écrit un traité sur la mathématique indienne dont il ne reste que la traduction latine, probablement œuvre d'Adelard de Bath, intitulée *Algoritmi de numero indorum*. On pense que par cette œuvre, inspirée de la mathématique de Aryabhata, la notation positionnelle décimale d'origine indienne arrive en Europe où on utilise encore les nombres romains.

Le système astronomique de Aryabhata se caractérise par divers éléments : rotation terrestre, explication des éclipses lunaires et solaires en termes d'ombres au lieu de la mythologie traditionnelle et modèle à épicycle et excentrique pour les mouvements planétaires. Dans l'ancienne astronomie indienne, on pense que les éclipses sont provoquées par deux démons, *Rahu* et *Ketu*, placés aux nœuds de l'orbite lunaire. Dans le vers IV, 9 de *Aryabhatiya*, l'auteur compare clairement le mouvement apparent des étoiles avec les objets stationnaires vus par un observateur sur un bateau. Ce mouvement diurne attribué à la Terre n'implique en aucune manière un mouvement orbital héliocentrique de la Terre, comme il semble apparaître avec évidence dans d'autres vers, III,15 et IV,6, selon lesquels la Terre est située au centre de l'espace, entourée par les orbites des planètes. Il faut rappeler, à ce propos, les recherches du mathématicien et historien des sciences Bartel Leendert van der Waerden (1903-1996).[35] Le savant hollandais pense que le système cosmologique de l'Aryabhata présente des traces d'un système héliocentrique précédent, d'origine hellénistique d'où il dériverait ; Seleucos pourrait en être l'origine. Sur la base de tout ce que nous avons vu au sujet des différentes « renaissances » il est tout à fait raisonnable d'imaginer que des textes hellénistiques, inconnus de nous, ont pris le chemin de l'Inde et ont inspiré les savants de cette culture. L'affirmation par Aryabhata du mouvement de rotation de la Terre ne sera pas acceptée par un grand nombre d'astronomes indiens qui lui succéderont. Aryabhata fournit aussi des formules pour la longueur et le diamètre de l'ombre terrestre, le temps de durée des éclipses et les dimensions de la partie éclipsée du Soleil et de la Lune. La théorie des éclipses lunaires a dû être perfectionnée par la suite grâce à d'autres astronomes indiens. Le sérieux de la méthode indienne de calcul des éclipses a été jugé dans un rapport de l'astronome français Guillaume Le Gentil (1725-1792) sur l'éclipse lunaire du 30 août 1765. Il se trouve dans ces années-là dans la région indienne pour suivre les transits de Vénus sur le Soleil, et déclare que la durée de l'éclipse, selon les calcul d'un astronome Tamoul, était seulement de 41 secondes trop courte, alors que la même calcul rapporté par les fameuses tables de Tobias Mayer de 1751 se révèle de plus de 68 secondes trop long.[34] mais en ce qui concerne la durée de la phase de

totalité, les tables de Mayer sont meilleures que la méthode tamoule. Il reste le fait que les algorithmes indiens qui remontent à Aryabhata sont comparables, sinon même meilleurs, que ceux des européens du XVIII<sup>e</sup> siècle. Aryabhata devient l'ouvrage d'astronomie le plus important du VI<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. ; cela est dû à son caractère de précis, non seulement des fondements de l'astronomie mais aussi des mathématiques qui lui correspondent. Les chapitres dédiés aux techniques mathématiques rendent plus simple et plus rapide pour les successeurs d'Aryabhata l'apprentissage de l'art des calculs astronomiques. On peut évaluer l'importance de ce traité par le fait que, en plus des nombreux travaux produits sur la base de son système, comme celui de Brahmagupta (598-628) et Bhaskara I (VII<sup>e</sup> siècle), sont rédigés une douzaine de commentaires sur l'Aryabhata entre le VII<sup>e</sup> et le XVIII<sup>e</sup> siècle. Il n'est pas étonnant donc que cette œuvre ait inauguré en Inde une ère durant laquelle la mathématique, en particulier l'algèbre et la trigonométrie se développent, de simple instrument pour l'astronomie telle qu'elle est au début, pour devenir une véritable discipline autonome.

On dédia à Aryabhata le premier satellite artificiel indien, lancé par l'Union Soviétique le 19 Avril 1975 ; il s'agit d'un satellite construit par *l'Indian Space Research Organization* (ISRO) pour l'observation des rayons X et pour la physique solaire.

Dans l'histoire de la science en Inde un rôle important revient à *l'école de Kerala*, important centre d'étude d'astronomie et de mathématique, fondé par Madhava di Sangamagrama (env. 1340-1425), astronome et mathématicien qui vécut à Kerala en Inde méridionale. L'école prospère entre le XIV<sup>e</sup> et le XVI<sup>e</sup> siècle et les découvertes originales de l'école semblent s'arrêter avec Narayana Bhattathiri (1559-1632). En tentant de résoudre différents problèmes d'astronomie l'école de Kerala créa indépendamment divers concepts mathématiques. Les plus importants résultats, comme l'expansion en série de fonctions trigonométriques, sont décrites en sanscrit dans une œuvre en vers de Nilakanthan Somayaji (144-1544). On peut affirmer avec certitude que les méthodes développées par les mathématiciens de Kerala sont beaucoup plus avancées que celles de leurs contemporains européens. En 1500 Nilakanthan Somayaji réexamina le modèle de Aryabhata relatif aux planètes Mercure et Vénus ; ses équations du centre des mouvements de ces planètes restent les plus précises jusqu'au temps de Johannes Kepler. Dans le traité *Aryabhatiyabhasya*, un commentaire d'Aryabhata, Somayaji développe son système de calcul pour un modèle partiellement héliocentrique dans lequel Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne gravitent autour de la Terre fixe. C'est donc un modèle semblable à celui proposé par Tycho Brahe au XVI<sup>e</sup> siècle. Toutefois le modèle de l'astronome indien est plus efficace que celui de Tycho parce qu'il prend correctement en considération l'équation du centre et le mouvement latitudinal de Mercure et Vénus. La majeure partie des astronomes de Kerala acceptèrent le modèle planétaire de Somayaji.

Actuellement les connaissances sur l'astronomie indienne restent incomplètes. Le grand historien des sciences Otto Neugebauer (1899-1990) s'est exprimé ainsi à ce sujet [34] :

« *Malgré le travail de pionnier fait par H.T. Colebrook (1765-1837), G. Thibaut (1848-1914) et d'autres, l'étude de l'Astronomie Hindi est encore à ses*

*débuts. La masse de matériel manuscrit non étudié en Inde comme dans les collections occidentales, est énorme. »*

– O. Neugebauer, *A History of Ancient Mathematical Astronomy*, Springer Verlag, Berlin, 1975

## 5 | Manuscrits perdus

Avant de passer à l'étude de l'œuvre de Copernic et des découvertes géographiques, occupons-nous d'un autre problème fascinant : Est-il possible que pendant la renaissance aient existé des manuscrits scientifiques de la période hellénistique indisponibles aujourd'hui ? Si nous essayons de reconstruire le climat culturel entre le XIII<sup>e</sup> et le XVI<sup>e</sup> siècle, nous nous apercevons que de temps en temps émergent des traces très explicites sur l'existence d'ouvrages scientifiques de l'antiquité qui nous sont inconnus. Il s'agit de témoignages sporadiques mais significatifs qui attestent la présence à l'époque médiévale et de la renaissance d'œuvres qui ont formé les idées des penseurs les plus pointus.

Au XVI<sup>e</sup> siècle reprennent notamment de la vigueur les études d'anatomie, surtout grâce à André Vésale (1514-1564) et Gabriel Fallope (1523-1562). Comme pour l'astronomie, le résultat le plus important est la redécouverte grâce à des manuscrits byzantins, de la science hellénistique du III<sup>e</sup> siècle ap. J.-C., qui représente un dépassement de la tradition remontant à l'âge impérial. en partie déjà acquise à travers les Arabes d'Espagne. Ptolémée est dépassé par Copernic en utilisant Aristarque, comme Galien, dans le domaine de la médecine, est dépassé en tentant la récupération de Hérophile de Calcédoine (env. 335-280 av. J.-C.).[9] Fallope, en plus de la découverte des *Trompes de Fallope*, déjà décrites par Hérophile, découvre aussi, entre autre *l'aqueduc de Fallope*, c'est-à-dire le trou dans le rocher temporal traversé par le nerf facial, lui aussi déjà décrit par Hérophile. Il reconnaît l'autorité de Hérophile au point qu'il en vient à écrire : « *Herophili auctoritas apud me circa res anatomica est Evangelium* ».

Figure 3. 10 Léonard de Vinci, Architrónico. Manuscrit B, l'Institut de France. (MS. B, c. 33r) Léonard décrit et dessine ce canon à vapeur en attribuant l'invention à Archimède. Francesco Petrarca fait aussi allusion à un dispositif semblable qui ne nous est connu par aucune autre source. Le premier à suggérer la construction de canons à vapeur a été Ctésibius (III<sup>e</sup> siècle ap. J.-C.), mais ses œuvres sont perdues. (Wikimedia Commons ; user OWK)

Lucio Russo souligne qu'il est peu vraisemblable que Fallope ait pu arriver à de telles convictions en ne connaissant Hérophile, comme nous, qu'à travers des citations tardives, surtout de Galien.[9] Il est possible, au contraire, que Fallope ait découvert aussi bien les trompes de l'utérus ainsi que beaucoup d'autres structures anatomiques, directement dans les écrits de Hérophile. Si au XVI<sup>e</sup> siècle cette œuvre de Hérophile avait survécu, il n'aurait pas été de l'intérêt certes du médecin

possesseur d'un tel trésor de divulguer son contenu en le faisant publier. Bien qu'il soit difficile d'en donner la preuve, il n'y a pas de raison de croire que toutes les œuvres hellénistiques disponibles à la Renaissance aient été conservées jusqu'à nos jours, ni que celles qui furent conservées aient toutes été imprimées ou soient en tous cas connues.

Une innovation technologique médiévale qui trouvera beaucoup d'application dans les siècles suivants dans le domaine astronomique, entre autre la résolution du problème de la longitude en mer, et la préparation des catalogues astronomiques, est l'horloge mécanique. Nous avons déjà examiné l'*Astrarium*, qui a un précédent immédiat dans l'horloge astronomique de Richard de Wallingford (env. 1292-1336), abbé de Saint Albans en Angleterre, qui a laissé une description détaillée du mécanisme.[22]

Les historiens se sont toujours demandé pourquoi donc l'horloge mécanique dès son apparition en Europe n'était pas primitive et élémentaire, mais était, au contraire déjà sophistiquée et très complexe. On ne peut qu'avancer des suppositions. Il semble qu'il y ait un vide d'environ 14 siècles entre la machine d'Anticythère et ces horloges du XIVe siècle européen. Mais nous savons aussi que la relation entre science et technologie est très claire pour les penseurs islamiques. Avicenne (Ibn Sina ; env. 980-1037) dans son *Traité sur la Sagesse*, énumère les diverses sciences qui dépendent de la géométrie, parmi lesquelles la science des automates, celle des instruments de mesure et la science des lentilles. Dans l'Islam la corporation des constructeurs d'automates, les « mécanismes merveilleux », prospère pendant des siècles et l'historien Derek J. De Solla Price (1922-1983) observe une étroite analogie entre la machine d'Anticythère et un mécanisme de al-Biruni produit autour de l'an 1000, ainsi que l'existence d'une série d'horloges chinoises entre le IIe et le XIe siècle ap. J.-C. avec des détails comparables à la machine d'Anticythère, aux mécanismes islamiques, et aux horloges astronomiques du XIVe siècle, y compris la forme des dents des engrenages. Les témoignages historiques relatifs à cette technologie mettent en évidence la circonstance selon laquelle en aucune de ces « redécouvertes » on observe une évolution, mais que les mécanismes au contraire apparaissent déjà sous une forme complexe. C'est ce qui pousse à faire l'hypothèse de l'existence de manuscrits qui nous sont inconnus, avec des descriptions précises de mécanismes d'horlogerie dont ils se seraient inspiré.[9]

On situe dans ce contexte certaines annotations de Léonard de Vinci (1452-1519). Plusieurs livres qu'a lu Léonard sur Archimède devaient contenir des informations qui ne sont plus disponibles aujourd'hui. Léonard par exemple, décrit et dessine un canon à vapeur, l'*Architronito* (Manuscrit B, Institut de France ; MS, B ; c. 33r) en attribuant l'invention à Archimède. [36] François Pétrarque (1304-1374) parle aussi dans le *De remediis utriusque fortunae*, de ce mystérieux dispositif qui serait sinon inconnu. Peut-être n'est-ce pas un hasard que Pétrarque ait été un ami et correspondant de Giovanni Dondi, le constructeur de l'*Astrarium*, dont le père Jacopo avait accès aux sources qui rapportaient la théorie hellénistique luni-solaire des marées. Il semble que ces intellectuels faisaient partie d'un milieu où circulaient différents manuscrits aujourd'hui perdus.

Le canon à vapeur dessiné par Léonard a été récemment reconstruit au M.I.T.. Il s'agit d'un prototype appelé *The ArchiMITes's steam cannon* et il a été testé le 5 novembre 2006.[37] le dessin de Léonard a été interprété dans le passé comme s'il y avait une injection directe, où l'eau rapidement pulvérisée dans une culasse chaude produit une explosion de vapeur qui lance le projectile. Mais plusieurs calculs faits par le groupe du M.I.T. suggèrent que les choses peuvent être différentes parce que la culasse ne peut pas fournir assez d'énergie pour produire une vapeur à haute pression. Les savants du *ArchiMITes* sont donc arrivés à la conclusion que l'injection directe produit seulement une petite bouffée de vapeur et pensent qu'il existe une autre manière d'interpréter les dessins de Léonard. Cependant ils ont décidé de ne pas révéler leur interprétation de l'Architronite parce que « *The solution is so simple, effective, and dangerous that we have decided not to disclose the details* » Des images prises pendant le test avec une caméra haute définition montrent que, à la bouche de feu, la vitesse est de 300 m/s

Quelle peut être alors la source de Léonard et de Pétrarque ? Le premier à suggérer un canon à vapeur est Ctésibius d'Alexandrie (env. 285-222 av. J.-C.), contemporain d'Archimède.[38] Il écrit les premiers traités sur l'usage des pompes et de l'air comprimé. Ses travaux sont perdus, mais on trouve leurs caractéristiques essentielles dans la *Mécanique* publiée par son successeur immédiat, Philon de Byzance (280-220 av. J.-C.) dont divers fragments sont arrivés jusqu'à nous. Il est raisonnable de penser qu'au temps de Léonard, il existait un manuscrit avec des dessins du canon de Ctésibius qui nous sont inconnus et que le scientifique italien a, par erreur, attribué à Archimède. Cependant quoi qu'on déduise de l'Architronite, on a forcément aucune certitude à ce sujet étant donné que l'opinion générale admet que plus de la moitié des manuscrits de Léonard n'ont pas survécu. Ceux qui s'enflamment pour les dessins de Léonard de Vinci et les considèrent comme des « anticipations » devraient les juxtaposer aux machines de Héron d'Alexandrie (env. 10 av. J.-C.-70 ap. J.-C.) Peu l'ont fait à cause de la rare diffusion des œuvres de ce dernier.[9] Nombre de mécanismes qui ont rendu célèbre Léonard, telles les presses, des démultiplieurs, des machines pour fileter les vis, « des roues à vent », etc., quand ce ne sont pas des copies de dessins de Héron, en sont très fortement inspirés. Dans d'autres cas, comme dans celui des chaînes de transmission, sa source est Philon de Byzance, (280-220 av. J.-C.) D'autres informations contenues dans les manuscrits de Léonard semblent basées sur des sources qui ne sont plus disponibles. Où Léonard a-t-il lu la possibilité d'agrandir les objets éloignés, en construisant un instrument utile, en particulier, pour observer les taches lunaires ? (Codex E de l'Institut de France, 15b) On peut supposer que Léonard a utilisé la même source qui permettra quelques années plus tard à Girolamo Fracastoro (1478-1553), en 1538, d'être un peu plus précis, en faisant allusion à l'emploi de deux lentilles, aussi parce que Fracastoro, médecin, poète et humaniste, fait allusion à l'emploi d'un instrument pour observer la lune (G. Fracastoro ; *Homocentrica sive de stellis*, II, viii ; IIIxxiii) De toute façon, il est certain que ni Léonard ni Fracastoro n'ont réussi à décrire en détail les lunettes dont ils parlaient et encore moins à les construire.[9]

Figure 3.11 L'apôtre « aux lunettes » dans le tableau d'autel de l'église de Bad Wildungen, Allemagne. Peint par Conrad von Soest en 1403 ; peut-être la plus

ancienne représentation des lunettes au nord des Alpes. (Wikimedia Commons ; user Gun Powder Ma)

En réalité la possibilité de construire des lunettes était connue bien avant Léonard de Vinci et Fracastoro, puisque Roger Bacon (env. 1214-1294) dans *l'Opus Maius*, livre V, parle avec enthousiasme de la capacité des « Anciens » d'agrandir les objets petits et de rapprocher ceux qui sont loin avec de bonnes combinaisons de lentilles et de miroirs, tout en n'arrivant pas même pas à exposer une théorie raisonnable dans le cas d'une seule lentille. Avant Bacon, la possibilité d'utiliser les phénomènes de la réfraction pour construire des microscopes et des lunettes avait été clairement exposée par Robert Grosseteste (env. 1175-1253) qui dans *De iride* (autour de 1230) rapporte une partie de l'optique, inconnue des latins, mais connue d'Aristote, qui concerne le passage d'un rayon à travers des corps transparents et qui « nous montre par quel moyen nous pouvons faire paraître très proches des choses très lointaines » (*De iride*, 73-74). [39] Peut-être que Grosseteste connaissait un ouvrage grec, attribué à Aristote, sur les applications de la réfraction.

A ce propos, il peut être utile de rappeler une étrange série de données fournie par Ptolémée dans son ouvrage *Hypothèse planétaires*, relatives aux dimensions des planètes.[31] Ptolémée déclare par exemple que Jupiter a un diamètre apparent de 1/12 du Soleil, un diamètre absolu de plus de 4 fois celui de la Terre, et un volume d'environ 82 fois celui de la Terre ; Saturne aurait aussi des dimensions analogues. Ces données sont intéressantes pour différentes raisons, mais ne semblent pas jusqu'à maintenant, avoir suscité l'intérêt des savants. Avant toute chose, si on a l'estimation des dimensions des planètes et que celle-ci montre que plusieurs d'entre elles sont plus grandes que la Terre, il est difficile de soutenir que ce sont elles qui tournent autour de nous. Ce n'est pas un hasard, en fait, si Aristarque, auteur d'un court traité *Sur les dimensions et distances du Soleil et de la Terre*, a été le premier à donner une estimation de la distance et des dimensions du Soleil et a été aussi un défenseur de l'hypothèse héliocentrique. De même Galilée au XVIIe siècle utilisera la découverte des lunes de Jupiter, astres plus petits qui tournent autour d'un corps de plus grandes dimensions, comme un argument en faveur de l'Héliocentrisme. En d'autres termes, affirmer que la Terre est « petite » est un formidable argument en faveur de l'héliocentrisme.. Rien de tout ceci ne se trouve évidemment dans les *Hypothèses planétaires* de Ptolémée ; lui ne tire aucune conséquence des données sur les dimensions des planètes. C'est là sans doute un indice ultérieur du rapport de Ptolémée avec ses sources. Quand il traite le même sujet dans plusieurs ouvrages, il change chaque fois la méthode employée sans jamais se citer lui-même.[9] Par exemple le phénomène de l'apparente augmentation des dimensions des objets célestes près de l'horizon est étudié aussi bien dans *l'Almageste* que dans *l'Optique*. Mais les explications qu'il donne sont complètement différentes dans les deux cas : l'une basée sur la réfraction, l'autre recourant à la psychologie et aucune des deux ne cite l'autre.

La série des données relatives aux dimensions des planètes demande réflexion. En fait l'aspect des planètes et des étoiles dans le ciel est seulement approximativement ponctiforme s'il est observé à l'œil nu, cela à cause de la

*diffraction* qui en distribue la lumière sur un imperceptible petit disque et c'est pour cette raison qu'il nous semble voir des « rayons ». L'unique chose qui distingue les planètes des étoiles est le fait que leur lumière ne palpite pas à cause de la *scintillation atmosphérique*, c'est-à-dire la variation rapide de la luminosité apparente ou de la couleur d'un objet observé à travers l'atmosphère. Une grande partie des effets provoqués par la scintillation sont causés par une réfraction anormale déterminée par des fluctuations à petite échelle de la densité de l'air. Cependant si nous observons une planète à l'œil nu elle ne scintille pas ni ne présente aucun diamètre perceptible.

Figure 3.12 Hermannus Contractus ; un tube dont la fonction est inconnue, est représenté. Une miniature d'un codex du XVe siècle conservé à la Bibliothèque Marciana de Venise montre aussi un astronome qui observe avec un tube. (Voir dans John Gribbin, « Enciclopedia dell'Astronomia e della Cosmologia Garzanti », 1998 ; op. orig. "Companion to the Cosmos", Orion Publishing, 1996.) (Wikimedia Commons; user GDK)

Il y a donc deux cas possibles : ou Ptolémée (et ses sources) identifient grossièrement la *magnitude apparente* d'une planète avec ses « dimensions » ou Ptolémée omet des détails sur le sens et l'origine de ces données. La première hypothèse, celle qui identifie des dimensions avec magnitude, présente des difficultés. Ptolémée affirme que Mercure a un diamètre apparent (en diamètres du Soleil) de 1/15, donc comparable à celui rapporté pour Jupiter, égal à 1/12, et pourtant il y a une disproportion entre leurs *magnitudes apparentes*. En fait Mercure oscille entre -0,4 et +5,5 selon sa position par rapport à la Terre et au Soleil, alors que Jupiter, variant de -1,6 à 2,8 est manifestement plus lumineux. Tenons compte que pour des raisons historiques les magnitudes négatives indiquent des luminosités plus grandes que les positives. Il suffit d'avoir un minimum d'habitude de l'observation astronomique pour se rendre compte que les magnitudes de Mercure et de Jupiter sont complètement différentes ; ce fut justement, Ptolémée, entre autre, qui a rapporté dans l'Almageste l'échelle des magnitudes inventée par Hipparque qui séparait les étoiles visibles à l'œil nu en six classes de magnitudes. Les étoiles les plus lumineuses étaient dites de première magnitude ( $m = +1$ ), les brillantes, la moitié de celles-ci étaient classées de seconde magnitude, et ainsi de suite jusqu'à la sixième magnitude ( $m = +6$ ) à la limite de la visibilité humaine.

Il semble donc raisonnable de chercher une interprétation moins banale pour ces données. Plutarque dans le *De facie* parle d'une théorie optique d'Hipparque, selon laquelle la lumière serait sujette à des changements de directions analogues aux déviations subies par les atomes comme le soutiennent les Epicuriens : on dirait la description des études sur la réfraction.[9] Peut-être que Hipparque avait trouvé la manière d'appliquer ses connaissances sur la réfraction en réalisant un simple système de lentilles, c'est-à-dire un télescope à faible grossissement qui lui a permis de mesurer les dimensions des angles des planètes.

On a soutenu que plusieurs images sur les manuscrits du Moyen Age où sont représentés des tubes avec lesquels des astronomes observent le ciel, étaient des

lunettes astronomiques. L'historien De Solla Price, dans «*A History of Technology*», Oxford, 1956, décrit deux illustrations, une contenue dans un manuscrit de Saint Gall de 982 contenant un ouvrage de Gerbert d'Aurillac et une autre dans un manuscrit du XIII<sup>e</sup> siècle. Le savant n'exclut pas qu'il s'agisse réellement de lunettes, mais il ne fournit pas la source de ses informations. Il est possible que ce soient deux tubes vides employés comme pare-soleil ou pour pointer une sphère armillaire vers l'étoile polaire. La question reste problématique et pas suffisamment étudiée par les historiens. Mais ce qui est important ce n'est pas qu'il existe des lunettes astronomiques au Moyen Age, qui d'ailleurs n'ont eu aucun rôle dans l'astronomie médiévale, mais de savoir si un traité hellénistique sur la réfraction, inconnu de nous, était disponible ; le témoignage de Grosseteste le laisserait supposer. Cela renforcerait l'hypothèse que la *dioptré* grecque était dotée de lentilles comme nous en avons posé l'hypothèse au Chapitre 2.

## Chap. 4 - Révolutions

### 1 | La révolution géographique.

La redécouverte des ouvrages de géographie de la période hellénistique eut des conséquences d'une portée incalculable. En mesurant des positions de lieux sur la terre on avait adopté, dans l'antiquité, des méthodes basées sur l'astronomie, nous sommes donc face à un exemple typique d'idées astronomiques qui changent littéralement notre vision du monde. Les conséquences des découvertes géographiques de Christophe Colomb auront aussi des répercussions qui vont favoriser une autre révolution : la révolution copernicienne.

Il existe une profonde différence entre la géographie mathématique hellénistique et les ouvrages de géographie de la Grèce classique, de Rome et du Moyen Age, qui sont purement descriptifs. La géographie mathématique telle que nous la connaissons par l'unique œuvre du genre conservée, la *Géographie* de Ptolémée, a tous les aspects d'une théorie « scientifique », comme une géographie moderne. En fait la géographie moderne n'est rien d'autre que celle de Ptolémée récupérée par les savants de la renaissance ; il s'agit d'un vrai *modèle mathématique* : à chaque lieu de la Terre, correspond un point d'une superficie sphérique identifié par un couple de coordonnées : latitude et longitude. Ptolémée décrit aussi la cartographie, c'est-à-dire qu'il sait utiliser différentes projections. Il se sert des propriétés mathématiques des projections coniques pour représenter la Terre sur des cartes planes pour garder toute l'information relative à la

représentation d'une superficie sphérique et reporter *latitude* et *longitude* d'environ 8000 localités, de l'Irlande au Sud-Est asiatique.[9] Bien qu'un lieu commun bien ancré attribue à Kepler la première application de la théorie des coniques, ces courbes avaient déjà eu diverses applications, comme le montre Ptolémée dans sa *Géographie*. La géographie mathématique remonte au début de l'hellénisme : suite à l'expansion du monde due aux conquêtes d'Alexandre le Grand, il devint indispensable d'obtenir une description précise de l'ensemble du monde connu. L'élève d'Aristote, Dicéarque de Messine (350/290 av. J.-C.) avait déjà fait un premier pas vers la construction d'une géographie mathématique, en déterminant un parallèle, et en dressant une liste des localités toutes situées à la même latitude, de Gibraltar à la Perse. Strabon rapporte que Cratès de Mallos, en Cilicie, dans la Turquie actuelle, réalisa un globe terrestre : ce serait donc la première mappemonde dont nous ayons connaissance (Strabon, *Geographia*, II, v, 10 [40]). Cratès, grammairien et philosophe stoïque grec du II<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. s'intéressait surtout à la critique et à l'exégèse d'Homère ; il était à la tête de la Bibliothèque de Pergame où, selon Plutarque, étaient conservés 200.000 livres. Au second siècle ap. J.-C. la géographie mathématique progressa surtout grâce au travail d'Hipparque de Nicée qui, en critiquant les méthodes de ses prédécesseurs, avait eu l'idée de déterminer les différences de longitude par des méthodes astronomiques, en mesurant l'heure locale à laquelle la même éclipse lunaire était observée dans les différentes localités (Strabon, *Geographia*, I, i, 12 [41]).

Le système de coordonnées sphériques fut récupéré au XV<sup>e</sup> siècle, quand arriva en Europe une copie byzantine de la *Géographie* de Ptolémée, tandis que la redécouverte d'instruments hellénistiques comme l'astrolabe ~~plat~~, permit aux marins de déterminer la latitude en haute mer par des observations astronomiques. Le problème de la détermination de la longitude, beaucoup plus complexe, sera résolu différemment, après des nombreuses et diverses tentatives, seulement au XVIII<sup>e</sup> siècle grâce à la technologie des horloges mécaniques. Cela favorisa les longs voyages en haute mer, qui étaient impensables au Moyen Âge.

La *Géographie* est composée en huit livres, dont le premier expose les bases théoriques, alors que les six suivants sont dédiés aux différentes parties du monde connu et contiennent surtout les coordonnées des localités. Le huitième et dernier livre utilisait les informations des livres précédents pour dessiner les cartes de l'ensemble du monde connu : 27 cartes, une générale et les autres pour les régions particulières. Ces cartes ne sont pas cependant parvenues jusqu'à nous : à cause de la difficulté de les copier, elles se sont perdues durant le processus de transmission du manuscrit. Durant l'antiquité tardive, la *Géographie* de Ptolémée était bien connue, autant dans le monde grec que dans le monde latin. Elle est à la base de la description du monde habité compilée par Pappus d'Alexandrie autour de 300 ap. J.-C. et est citée par Ammien Marcellin (env. 330-391 ap. J.-C.), historien romain qui décrit en outre le tsunami qui frappa Alexandrie le 21 Juillet 365. Vers la moitié du VI<sup>e</sup> siècle la *Géographie* fut citée par Cassiodore. Par la suite on en perd les traces en Europe occidentale, alors qu'elle continue à être bien connue dans le monde byzantin jusqu'au XII<sup>e</sup> siècle, quand Jean Tzetzes (env. 1110/1180) inclut dans ses *Chiliades* une transposition en vers de plusieurs passages de l'œuvre. Dès lors, pendant environ un siècle, la *Géographie* semble oubliée même à Constantinople. Entre temps le monde islamique l'a connue, peut-être

indirectement, jusqu'au IX<sup>e</sup> siècle. Vers 1300, l'ouvrage est retrouvé par le savant byzantin Maxime Planude (env. 1260/1330) qui en reconstitue les cartes perdues sur la base du texte et le traduit en latin. Après l'édition latine de 1406 par Jacopo d'Angelo da Scarperia (env. 1360/1410), latiniste et helléniste, secrétaire du Pape Alexandre V, on prépara différentes cartes sur la base des données de Ptolémée, promouvant une renaissance de la cartographie qui apporta une contribution fondamentale aux voyages d'exploration. Plus tard, d'Angelo réussit à emporter en Europe une copie de l'ouvrage depuis Constantinople. La *Géographie* fut imprimée en 1477 et en 1482; Francesco Berlinghieri (1440/1501) publia la première édition en langue vulgaire italienne. Pour apprécier l'importance de cette publication il suffit de comparer par exemple la carte de 1492 de Martin Benhaim avec une carte européenne antérieure comme la *Hereford Mappa Mundi*, dessinée vers 1300 en Angleterre, où le monde est un disque avec au centre Jérusalem et où les continents, méconnaissables, sont séparés par de fines lignes d'eau.

Le texte grec d'origine a été imprimé pour la première fois en 1533 dans une édition préparée par Erasme de Rotterdam (1466-1536). L'édition la plus récente est celle de Nobbe de 1843-45. Mais il n'est pas facile de lire l'ouvrage dans une traduction rigoureuse.

Une autre *Géographie*, celle de Strabon mérite un discours à part ; complétée vers 23 ap. J.-C. elle nous est parvenue presque intégralement. Par l'ampleur des matériaux offerts, la précision des références toponymiques, les fréquents *excursus* (digressions) historiques, l'ouvrage de Strabon est un instrument dont il faut tenir compte pour l'étude de nombreux aspects du monde antique. Mais il s'agit d'une œuvre descriptive étrangère à la tradition de la géographie mathématique. Pour Strabon, la géographie est une partie de la philosophie, et, en réfutant ses prédécesseurs, il montre qu'il n'est pas très à l'aise dans le domaine de l'astronomie et des mathématiques. Cette œuvre eut peu de succès dans l'antiquité : Ptolémée la néglige complètement. Pline, collectionneur de nouveautés, sans esprit critique, ne la mentionne pas ; c'est seulement plus tard qu'on commence à la citer. Au Moyen Age et à la Renaissance l'ouvrage sera pris en grande considération et intégralement transmis. Les idées de Strabon furent largement diffusées dès le Concile de Florence en 1439, qui fut une excellente occasion pour échanger des nouvelles notions de cosmographie. Une traduction de cette *Géographie* par Guarino Veronese existait depuis 1458 et fut publiée en 1469.

La redécouverte de la géographie mathématique de Ptolémée réactualisa une vieille idée hellénistique rapportée par Strabon : celle d'atteindre les Indes en navigant vers l'occident (Strabon, *Geographia*, I,i 12 [17]. Sept ans après la publication de la *Géographie* de Ptolémée, Christophe Colomb exposa son projet au roi du Portugal et huit ans plus tard, il tenta courageusement l'expédition. Il nous faut interpréter cette proximité temporelle comme une profonde filiation entre ces deux événements. Le voyage de Colomb et ceux qui suivirent de Magellan et d'autres, confirmèrent par l'expérience, des hypothèses fondées auparavant sur la théorie ; ils fournirent en outre à la science de nombreuses observations imprévues. Les projets de traversées de l'Atlantique de Colomb constituent un exemple clair de tout ce qu'un schéma conceptuel peut engendrer de résultats ; ils montrent comment la théorie est capable de guider un scientifique dans un domaine inconnu, en lui apprenant où il doit regarder et ce à quoi il peut s'attendre de trouver. Mais le

guide donné par les modèles n'est pas toujours clair et direct ; plus que des directives précises, il s'agit souvent de suggestions pour l'organisation et la recherche. Suivre ces indications théoriques demande un travail d'extension et d'extrapolation. Du moment que les idées ne naissent pas du néant, il semble que l'histoire nous apprenne qu'il est préférable d'être guidé par une théorie, même erronée, plutôt que de ne pas en avoir. C'est pourquoi il vaut mieux tenter de rejoindre l'Asie, et découvrir à sa place un nouveau continent, plutôt que de rester au port de Palos de la Frontera. De même qu'il est plus utile de faire des expérimentations sur des processus d'oxydation et de combustion en étant guidé par la théorie erronée du *phlogistique*, que de rester assis dans un laboratoire, complètement privé d'idées. Même si Colomb se trompait quand il croyait pouvoir atteindre la Chine en navigant vers l'ouest, son expédition et les voyages qui la suivirent démontrèrent clairement l'inadéquation de la connaissance du monde de Ptolémée. La révolution géographique imposée par la découverte du Nouveau Monde facilita la voie d'un réexamen critique de Ptolémée astronome, c'est-à-dire de *l'Almageste*.

Ce fut Christophe Colomb (1451-1506) qui déclencha cette révolution ; agent commercial génois, il conçut le projet d'une traversée de l'Atlantique. [42, 43] Mais avant lui, vers l'an 1000 plusieurs navigateurs scandinaves atteignirent les côtes du continent américain. Leif Ericson (ancienn. Leifr Eiriksson) fut lui aussi un découvreur de l'Amérique, mais sa découverte était trop prématurée et pour cette raison, elle n'eut pas d'évidentes répercussions en Europe. La découverte de Colomb au contraire, allait dans le sens de son temps.

Figure 4.1 Les routes suivies par quelques personnages des sagas islandaises au Groenland, Vinland (Groenland), Helluland (Terre de Baffin) et Markland (Labrador). (Wikimedia Commons ; user Masae)

Les expéditions de ces navigateurs nordiques sont racontées dans la *Groendenlinga saga* ou *Saga des Groenlandais*. Il s'agit d'un récit islandais qui avec la *Eiriks saga rauda* ou *Saga d'Erik le Rouge* est une des principales sources littéraires qui raconte la colonisation du Groenland où sont arrivés Erik le Rouge et ses compagnons. Il décrit ensuite plusieurs expéditions vers l'occident conduites par les fils d'Erik et par Thorfinn Karlsefni. La saga est conservée dans le manuscrit *Flateyjarbok* de la fin du XIV<sup>e</sup> siècle, connu aussi comme le *Codex Flateyensis*, le manuscrit le plus long du moyen âge islandais. On pense que sa rédaction a été commandée la première fois au XIII<sup>e</sup> siècle alors que les événements rapportés remonteraient à une époque entre 970 et 1030. Bien que plusieurs passages de la saga racontent des événements extravagants, on pense ~~de toute façon~~, toutefois qu'elle contient un minimum de vérité historique.

Pour nommer ces navigateurs, il nous faut adopter le terme *Norsemen* et l'adjectif *norse* ou *norrois*. Norsemen ou Northmen (« *hommes du nord* ») sont les noms donnés à un groupe d'individus parlant une langue germanique du nord. Le terme *Norse* se réfère au *Vieux Norrois* langue parlée alors par les populations danoises, suédoises, norvégiennes et islandaises, idiome appartenant à la souche Germanique Septentrionale des langues indo-européennes. Entre le VIII<sup>e</sup> et le XI<sup>e</sup>

siècle ces termes ont été utilisés pour nommer les peuples de la Scandinavie centrale et méridionale. Il serait erroné d'adopter le terme « normand ». Par ce mot on se réfère aux populations nordiques qui se sont établies aussi bien en Normandie, en France et en Italie Méridionale où elles ont créé un état aux dimensions considérables : le Royaume Normand de Sicile, à partir du dernier quart du IX<sup>e</sup> siècle. Le terme *viking* serait lui aussi impropre : il indique une appartenance à ces populations côtières qui s'adonnaient à la piraterie, installées dans les fjords (« *vik* » signifie en fait « baie »). Dans l'Europe continentale on désigne habituellement par *vikings*, ces explorateurs, commerçants et guerriers norrois, originaires de Scandinavie, qui, à bord de bateaux, ont fait des raids sur les côtes des îles britanniques, de la France et d'autres régions d'Europe entre la fin du VIII<sup>e</sup> et du XI<sup>e</sup> siècle. Les slaves et les byzantins appelèrent ensuite ces gens des *varègues* (hommes assermentés) car les soldats de la garde du corps des empereurs byzantins étaient désignés comme la *garde varègue*. Ces peuples du nord ne sont pas exactement les barbares décrits par la culture populaire ; leur technologie est la même que celle de nombre de petits centres dans l'espace rural de l'Europe médiévale.

Divers documents historiques attestent l'expansion des norsemen vers l'occident. Par exemple le pape Pascal II (1050-1118) nomma le premier évêque du Groenland et des régions les plus occidentales ; dans la bulle de nomination du premier évêque, Erik Gnuþsson, on lit en fait « *Groenlandiae regiumque finitimarum* ». Puis à cause du *Little Ice Age*, à partir du début du XIV<sup>e</sup> siècle, il y eut une baisse de la température dans l'hémisphère boréal, le Groenland fut abandonné ainsi que les implantations des norsemen d'Amérique du Nord qui venaient de là, même si plusieurs documents attestent des contacts successifs. Ce qui est sûr, c'est qu'à l'Anse aux Meadows, dans la partie la plus septentrionale de l'île de Newfoundland (Terre Neuve) au Canada, les norsemen étaient présents. L'*Anse aux Meadows* (altération du français, l'Anse aux Méduses, ou plutôt la baie des méduses) est un site archéologique où, en 1960, l'explorateur norvégien Helge Ingstad et sa femme, l'archéologue Anne Stine Ingstad, découvrirent les restes d'un ancien village norrois. Il s'agit de l'unique village norrois attesté en Amérique du Nord en dehors du Groenland ; on y a fait des fouilles archéologiques pendant des années ; elles ont mis au jour des habitations, des objets et des ustensiles compatibles avec la civilisation norroise. L'implantation remonte à plus de cinq siècles, avant les voyages de Christophe Colomb et on y trouve les plus anciennes constructions européennes des Amériques. Inscrit sur la liste du Patrimoine de l'humanité de l'UNESCO, beaucoup pensent qu'il s'agit du légendaire Vinland, l'implantation de l'explorateur *Leifr Eiriksson* autour de l'an 1000. Bien qu'il ne soit pas possible d'affirmer avec certitude que l'Anse aux Meadows soit vraiment le *Vinland* de la saga, il est certain qu'un groupe de colonisateurs norsemen y a vécu entre la fin du X<sup>e</sup> et les débuts du XI<sup>e</sup> siècle, même si le site n'a été utilisé que pendant deux ou trois ans. [44] On pense, sur la base de preuves, aussi bien archéologiques que littéraires, que l'abandon a été causé par les mauvaises relations avec les indigènes américains, appelés par les norsemen *skraelingar* (pluriel de *skraeling*). C'est le nom que donnaient les groenlandais norse du moyen âge aux Dorset et à la population Thulé au Groenland. Quand ensuite les norsemen entrèrent en contact avec les populations d'Amérique du Nord (probablement les ancêtres des Beothuk), ils se référèrent à eux avec le même nom. Selon la *saga*

d'*Erik le Rouge* et la *Saga des Groenlandais* les norsemen commencèrent à explorer les terres à l'ouest du Groenland peu après leur installation sur cette île. En 985 alors qu'ils naviguaient d'Islande vers le Groenland avec une flotte de 400 à 700 colons et plus de 25 navires, dont 14 terminèrent le voyage, un marchand nommé Bjarni Herjolfsson fut dérouté et après trois jours de navigation, il vit la terre à l'ouest de la flotte. Bjarni ne s'intéressait qu'à la recherche de la ferme de son père, mais il décrivit sa découverte à Leifr Eiriksson qui explora l'endroit plus en détail et installa une petite colonie quinze ans plus tard. Les sagas décrivent trois aires séparées, découvertes durant l'exploration : *Helluland*, qui signifie « terre des pierres plates » ; *Markland*, « la terre des forêts » et *Vinland* « la terre du vin » trouvées quelque part au sud du Markland. C'est dans le Vinland que fut installée la colonie décrite dans les sagas. Une autre interprétation du nom Vinland, plutôt populaire au XX<sup>e</sup> siècle, soutient que le premier élément n'est pas *vin* (avec un son de la voyelle plutôt allongé) mais *vin* (avec un son bref, comme le mot anglais *tin*), un mot vieux norrois qui signifie « pré », « pâturage » (Proto-Norrois *winju*). Vin est un nom commun à nombre d'anciennes fermes au temps des norsemen en Norvège et actuellement on le retrouve dans le toponyme Byorgvin, le nom norrois et islandais de la ville de Bergen en Norvège. Markland est peut-être le nom donné à la côte du Labrador, au Canada, par l'explorateur islandais Leifr Eiriksson qui fut le premier européen à atteindre l'Amérique septentrionale. Le nom Markland qui, en norrois, signifie soit « terre des forêts » soit « terre des confins », était au nord du Vinland et au sud de l'Helluland. Eiriksson rapporta plusieurs arbres du Markland au Groenland, où il n'y avait pas d'arbres à cause de la rigueur du climat trop froid ; on a jamais retrouvé de traces de colonies norsemen dans le Markland et peut-être ne s'y sont-ils jamais installés. [43]

### **Expédition antarctique**

*Men wanted for hazardous journey. Small wages. Bitter cold. Long months of complete darkness. Constant danger. Safe return doubtful. Honor and recognition in case of success.*

Attribuée à Sir Ernest Shackleton (1814-1922). On pense que c'est une publicité de 1901 sur un quotidien anglais à la recherche de volontaires pour une expédition antarctique. Pourrait être apocryphe.

Dans ses souvenirs de 1495 Colomb dit que en février 1477, (la date est discutable pour un souvenir si lointain), il navigua « *pendant cent lieues au-delà de l'Islande* », étant parti de Bristol, comme on le déduit du contexte. Il est possible que Colomb ait participé à un voyage de Bristol vers l'Islande. Dans son affirmation, il n'y a rien d'in vraisemblable et la participation à un voyage de ce genre justifierait aussi la visite à Galway en Irlande qu'il mentionne dans une autre annotation dans la marge.[42] Il est possible que durant ce voyage dans l'Atlantique septentrional, Colomb ait entendu des récits d'islandais sur le Groenland et les terres situées encore plus à l'ouest. Peut-être, mais comme nous le verrons, le lien entre les explorations des norsemen et Colomb est probablement beaucoup moins direct et évident.

La genèse complexe de l'idée de Colomb tire son origine au contraire de ses expériences de marin et de ses lectures. Il est vrai que, au début du XV<sup>e</sup> siècle, l'intérêt académique pour la limite orientale de l'Asie augmenta sensiblement, et cela coïncida avec la diffusion de la *Géographie* de Ptolémée qui força les savants à penser au globe terrestre dans sa totalité en termes quantitatifs. L'image du monde et en général les idées géographiques de Colomb prirent forme entre les débuts de son apprentissage de cosmographe en autodidacte, probablement dans les années quatre-vingt du XV<sup>e</sup> siècle, et la période de ses écrits systématiques sur ce sujet, de 1498 et après. Si on exclut ses théories géodésiques tout à fait erronées, Colomb a un rapport assez marginal avec l'astronomie.[45] On le représente quelquefois avec les étoiles et de rudimentaires instruments de navigation astronomique, mais les rares témoignages qui existent sur l'usage que Colomb faisait des étoiles pour naviguer nous amènent à penser qu'il aurait pu obtenir les mêmes résultats en essayant de deviner. Désorienté par les ciels des tropiques et l'absence d'étoiles circumpolaires qu'il connaissait bien, il prit deux fois de suite *Beta Cephei* pour l'étoile Polaire, obtenant une latitude de 21 degré plus au nord que la latitude réelle. Colomb était expert en navigation sur plan, pas en navigation astronomique. Le seul fait digne d'être rapporté, lui aussi entouré de légende, qui démontre que Christophe Colomb savait manier des concepts astronomiques, fut lorsque il utilisa les *Ephémérides* de Johannes Müller (Regiomontanus) pour prévoir une éclipse lunaire imminente. Lors de son quatrième voyage, Colomb resta bloqué à la Jamaïque avec des bateaux endommagés. L'aide tardait à arriver d'Hispaniola et les mois passaient. Alors les indigènes, fatigués de recevoir en échange des colliers de verre et autre pacotille, refusèrent de fournir de la nourriture à l'équipage de Colomb. Selon la légende, Colomb apprit dans ces *Ephémérides* qu'il devait y avoir une éclipse de lune la nuit du 29 février 1504 et il se hâta d'informer les indiens que la lune se lèverait noire et sanglante, signe de colère divine envers leur comportement hostile. Le navigateur ne se montra pas avant la fin de l'éclipse et sortit de sa cabine en annonçant que Dieu avait écouté ses prières et qu'il s'était adressé à lui, en faveur des indiens. L'événement impressionna tellement les indigènes qu'ils fournirent à Colomb beaucoup plus de nourriture qu'il n'en fallait pour survivre. Au delà de la réalité de l'épisode, cela montre l'importance que les tables planétaires avaient à l'époque.[46]

Figure 4.2 La carte de l'Océan Atlantique de Paolo dal Pozzo Toscanelli de 1474. Il est très probable que Colomb la connaissait. Le Catay, c'est la Chine, l'île de Cipangu, le Japon et Antillia (*anti ilha*, c'est-à-dire île opposée [au Portugal ?]) c'est une île mythique de la tradition portugaise qui selon plusieurs études pourrait être en réalité l'île de Formose ou Taïwan, connue en Occident par l'intermédiaire des vénitiens. (Wikimedia Commons ; user Alex.D)

Il est difficile de connaître des données simples et exactes concernant Colomb parce que pendant cinq siècles l'historiographie de Colomb s'est fiée à des sources ni irréfutables, ni vérifiées ; on constate par exemple une influence biaisée des auteurs du XVI<sup>e</sup> siècle que les chercheurs ont parfois utilisés trop légèrement comme des sources de première importance. Et puis il faut éviter

d'admettre les légendes créées par l'explorateur lui-même. L'image transmise par la tradition historique d'une personne exceptionnellement déterminée est fautive et n'a aucun fondement dans les documents. Le sens de la « mission divine » a grandi graduellement chez Colomb ; ses idées sur la géographie ont pris forme lentement et ont été très variables au début. L'opinion contraire selon laquelle il est resté fidèle à ses idées avec une constance inébranlable, indifférent aux railleries, remonte à une reconstruction d'auto-promotion de la part de Colomb lui-même dans la dernière partie de sa vie. [43] En réalité l'étude des documents qui se réfèrent à Christophe Colomb montre comment le navigateur génois a tenu compte, durant le processus de maturation de ses idées, de trois objectifs possibles :

- une recherche de nouvelles îles à l'occident ;
- un raccourci pour l'Asie ;
- la recherche des Antipodes.

Si nous rejetons la tradition, en partie hagiographique, qui dit que son projet était déjà complètement établi au moment de la première traversée de l'Atlantique, de même que l'opinion contraire de ses détracteurs, pour qui Colomb, sorte de *useful idiot*, aurait adopté la conception géographique toute prête, de quelque instigateur inconnu, on peut imaginer que le processus de sa formation intellectuelle a été long et complexe. Ce parcours s'est déroulé tout au long de sa carrière de navigateur transatlantique, et s'est nourri autant d'expériences et d'observations que de lectures. Ses idées en géographie ont donc évolué sans arrêt en subissant parfois des révisions drastiques. Pendant une partie de la période 1480-1490, décennie décisive pour sa formation intellectuelle, Colomb abandonna son travail de navigateur de commerce pour devenir libraire et cartographe. Grâce à cette nouvelle activité, il put avoir un accès privilégié aux livres. Les annotations griffonnées en marge d'une poignée de livres rescapés des deux frères Colomb, Christophe et Bartholomé, aux graphies difficiles, presque indistinctes, sont le seul témoignage de première main que nous possédons sur la formation intellectuelle de Colomb. La difficulté de dater des livres qu'il a pu lire ou relire plusieurs fois sur une longue période risque d'attribuer à la première phase de la vie de Colomb des idées et des intérêts qui ont mûri plus tard. Que ces lectures aient eu une influence ou non sur l'élaboration de son projet, elles contribuèrent sans aucun doute à la présentation de ce projet aux autorités ; Colomb exposa ses idées aux souverains espagnols en se servant de cartes et de livres. Il est tout aussi plausible de soutenir qu'il recourait à l'autorité des textes pour y trouver confirmations et commentaires à ses idées, suggérées par l'expérience, que d'affirmer que ses expéditions dans l'Atlantique furent une application de théories académiques. Il est probable que les deux perspectives coexistaient chez Colomb. Son expérience de marin n'était pas disjointe de son savoir de cosmographe.[43]

A Lisbonne, Colomb commença à se documenter et à lire des textes de géographie, comme *l'Historia rerum ubique gestarum* du pape Pie II (*Æneas Silvio Piccolomini*), imprimée en 1477, *l'Imago Mundi* de Pierre d'Ailly (1480) et *le Million* de Marco Polo. Une lettre de Paolo dal Pozzo Toscanelli (1397-1482) exerça une grande influence sur la décision que prit Colomb par la suite ; elle fut adressée en 1474 à un chanoine de Lisbonne, Fernao Martins de Reriz. Dans cette lettre, que Colomb probablement connaissait, le savant florentin pensait qu'une

route vers l'ouest pour atteindre l'Inde était possible ; nous avons des copies de la correspondance avec Toscanelli de la main de Colomb, cousues dans la page de garde de son livre : on ne peut donc pas dire qu'il ne connaissait pas ces nouvelles idées. Il est probable qu'il ait reçu ces lettres avant 1492. De toute façon elles montrent le genre de projets qui étaient dans l'air avant le départ de Colomb et la diversité des avis sur la nature de l'étendue de l'Atlantique. Toscanelli estimait à environ 5000 milles nautiques la distance des Canaries du Catay, ce qui était beaucoup par rapport aux évaluations habituelles de l'époque ; mais le voyage, à son avis, pouvait faire étape à « Antillia », l'île mythique de la tradition portugaise, ou au Japon qui, de l'avis autorisé de Marco Polo, devait se trouver à une grande distance de la Chine. La représentation de l'Atlantique de Toscanelli, ou une version très semblable, fut très vite proposée par les cosmographes de Nuremberg : nous la trouvons avec de petites modifications sur une mappemonde faite dans cette ville par Martin Behaïm en 1492.

Il est surprenant que Colomb n'ait jamais cité Toscanelli parmi ses sources autorisées ; mais c'est seulement à partir de 1498 qu'il prit l'habitude de citer ses sources. A cette date il avait dans ses tiroirs un quantité de sources considérables, classiques, bibliques, patristiques et apocryphes, mais nous pouvons légitimement soupçonner que certaines omissions répondaient à une ligne de conduite, dont le but était d'éviter de trop découvrir ses cartes pour s'assurer un avantage sur d'éventuels concurrents. Même l'Atlantique de Toscanelli était en pratique trop large pour une traversée. Colomb proposa de le réduire argumentant que « *ce monde est petit* ». Dans les écrits qui sont conservés, Colomb ne se préoccupe précisément des dimensions du globe que très tard ; le premier traité sur ce problème est d'août 1498. Mais, sur la base d'indices, on peut supposer qu'il partagea et accentua la tendance contemporaine de sous-évaluer. Les documents sur lesquels se fondaient ses calculs étaient presque entièrement tirés de l'*Imago Mundi* de Pierre d'Ailly, que Colomb avait probablement déjà lu en 1488, année de la première annotation datable avec certitude qu'il avait rédigée avec son frère sur ce texte. Quand il exposa en détail son projet il fit le choix de faire une sous-estimation plus poussée que toutes les autres : inférieure de 25% au chiffre réel et au moins de 8% à l'estimation la plus optimiste de son temps, d'après ce qu'on sait.

On sait que Eratosthène avait mesuré au III<sup>e</sup> siècle av. J.-C. avec une très bonne approximation la longueur d'un degré de méridien en 700 stades. La même mesure avait été acceptée un siècle plus tard par Hipparque, alors que au I<sup>er</sup>- II<sup>e</sup> siècle Marin de Tyr et Ptolémée adoptèrent une valeur de 500 stades.[9] Il semble que la différence entre les deux mesures ne soit pas due à l'emploi de *stades* de longueur différentes, mais que Ptolémée ait effectivement attribué une longueur différente au méridien. Cette erreur amena Colomb, dont les connaissances géographiques étaient basées sur la *Géographie* de Ptolémée, à sous-évaluer notablement les dimensions de la Terre. La base déclarée de ce calcul était évidemment erronée : dans une annotation non datée sur sa copie du livre de Pierre d'Ailly, Colomb dit que les comparaisons qu'il a faites des latitudes observées et des distances enregistrées durant un voyage dans le Golfe de Guinée, l'avaient convaincu que le périmètre des terres à l'équateur était de 20.400 milles et, selon Colomb, c'était aussi l'opinion de al-Farghani.[45] Or, la valeur donnée par « Alfragano » était exprimée en milles beaucoup plus longs que ceux des auteurs

grecs. Colomb, qui avait l'information de seconde main de Pierre d'Ailly, ne prit pas soin de vérifier les unités de mesure. Et même si ses chiffres avaient été justes, on aurait pas pu les vérifier de la manière qu'il avait décrite, c'est-à-dire en employant « *un quadrant et d'autres instruments* ». Au XV<sup>e</sup> siècle cette méthode ne permettait pas de déterminer la latitude en mer avec précision : le calcul était trop imprécis, et en tout cas Colomb ne pouvait avoir la certitude que sa route pour la Guinée avait suivi un cercle maximum de la Terre (méridien). Les géodètes et arpenteurs islamiques avaient refait les calculs d'Eratosthène : al-Farghani, au IX<sup>e</sup> siècle, obtint l'équivalent de 20.400 milles arabes soit 40.253 km. Colomb fit l'hypothèse erronée que le mille arabe était équivalent au mille romain, ce qui l'amena à calculer une circonférence de 30.044 km., à peine les trois quart de la valeur effective. En plus Colomb surestima l'extension longitudinale de l'Asie et donc sa distance de l'Europe. Il calcula que le Japon se trouvait juste à 283 degrés de distance, direction est, et à moins de 5000 km. des Canaries, direction ouest. Ces deux erreurs donnèrent une apparence raisonnable à son objectif de rejoindre les Indes en partant vers l'occident.

Il est difficile d'expliquer comment les savants espagnols appelés à juger le projet de Colomb aient pu donner un avis favorable sur la base de leurs connaissances : il était aussi possible que l'estimation de al-Farghani soit correcte et que l'Asie se trouve à une distance impossible à atteindre. Il est vrai que la chute de Constantinople quelques décennies auparavant, en 1453, était pour l'Occident une puissante motivation géopolitique pour essayer de nouvelles routes vers l'Orient, même si les probabilités de succès pouvaient paraître faibles. Il devait y avoir aussi des raisons non exprimées, un *milieu* culturel qui poussait les savants à cultiver l'idée de la proximité de l'Europe des côtes orientales de l'Asie.[47] Et c'est précisément quand toutes les informations nécessaires pour prendre une décision rationnelle ne sont pas disponibles qu'entrent en jeu des éléments étrangers. En d'autres termes une logique rigoureuse est l'instrument le plus efficace pour prendre des décisions, mais si on se retrouve dans des situations d'incertitude, avec des données insuffisantes, il faut compléter « l'information » manquante par des raisonnements *heuristiques*. Les circonstances complexes et tourmentées qui amenèrent à la reconnaissance de l'existence d'une masse continentale distincte de celle de l'Eurasie, sont un exemple d'un type de méthode scientifique *empirique* qui par l'intermédiaire d'erreurs et d'essais réussit de toute façon à se corriger.

L'idée de naviguer vers l'Occident pour atteindre l'Asie n'était pas seulement de Colomb. Les historiens connaissent plusieurs de ses contemporains et prédécesseurs ayant développé la même idée, et plusieurs d'entre eux recherchèrent activement une aide financière pour le voyage. Même sans Colomb, l'Amérique aurait probablement été découverte quelques années plus tard. Le projet était *dans l'air*. En fait pas plus de trois ans après que Colomb ait tenté d'obtenir un appui auprès de la cour portugaise, un aventurier flamand, Ferdinand van Olm, obtint du Portugal un mandat pour un projet assez semblable, visant à trouver des îles et des terres dans l'Atlantique. Au vu de la fréquence avec laquelle apparaissent ces documents dans les archives portugaises, obtenir un mandat d'exploration était facile ; pour les années entre 1462 et 1487, on en conserve huit. Il semble donc qu'il y avait quelque chose de plus fort que l'opinion erronée des anciens auteurs ;

quelque chose en mesure de pousser ces candidats explorateurs à arpenter des années durant les cours royales et à risquer leurs vies en mer pour défendre leur thèse sur la distance de l'Asie, sur laquelle les théoriciens contemporains restaient sceptiques. Nombre de savants se sont penchés sur les motivations de Colomb ; ils ont complètement négligé les motivations de ceux qui soutenaient des projets similaires.[47] Etaient-ils tous fous ? Pourquoi au XV<sup>e</sup> siècle se diffusa la tendance à la sous-évaluation de la largeur l'Atlantique ? D'où naît cette *théorie de l'Atlantique étroit* ? Avant de répondre à cette question qui nous intrigue, sur la perception de la distance des terres occidentales à l'époque de la Renaissance, intrigue, tournons notre regard du côté opposé : vers l'Orient et ses richesses.

### Méthodes heuristiques

Les méthodes heuristique ou *l'heuristique* est une technique basée sur l'expérience employée dans le *problem-solving*, dans l'apprentissage et dans la découverte ; le terme dérive du grec *heuriskein* « trouver ». Les heuristiques sont grosso modo des méthodes ; elles sont basées sur des critères subjectifs et empiriques, comme les conjectures, intuitions, ou simplement le sens commun. Plus précisément, on entend par heuristique les stratégies qui utilisent des informations ou des critères généraux, rapidement accessibles et applicables aux problèmes concernant aussi bien les êtres humains que les machines. Voici un exemple d'heuristique. Essayez de répondre à cette question : est-il plus probable que le numéro de téléphone 110 soit celui de monsieur Mario Rossi ou celui d'un service d'urgence ? La réponse est simple : il est beaucoup plus vraisemblable que le 110 corresponde à un service public. Mais sauriez-vous justifier sur quoi vous basez votre conviction ? Même si vous ne vous en rendez pas compte vous êtes en train d'adopter un raisonnement heuristique selon lequel les numéros d'urgence doivent être faciles à mémoriser et rapides à composer et donc ils ont peu de chiffres, alors que les usagers privés ont des numéros beaucoup plus longs et dus au hasard. C'est l'expérience qui nous l'apprend, personne ne nous l'a jamais dit explicitement. La méthode heuristique adoptée ici a donc un fondement d'expérience, qui tout en n'étant pas basée sur une démonstration logique et rigoureuse, ne peut même pas être raisonnablement discuté. Quelquefois l'heuristique dégénère dans une application trop désinvolte du *principe d'induction* : le fait que dans mon expérience j'ai *toujours* vu des girafes au zoo parce que j'habite dans une ville européenne, ne m'autorise pas à conclure que toutes les girafes se trouvent au zoo. Une importante heuristique est le Rasoir d'Occam, alors que l'heuristique la plus fondamentale est « essaie et corrige » qui s'applique soit quand on ajuste la longueur de la chaîne d'une bicyclette soit pour trouver les valeurs des variables dans les problèmes d'algèbre.

Le mathématicien hongrois George Polya (György Polya, 1887-1985), a étudié les méthodes heuristiques comme instrument de découverte dans le domaine mathématique ; voici quelques unes des heuristiques considérées dans son livre classique « *How to solve it* » de 1945.

- Si tu ne peux pas découvrir la solution, essaie d'imaginer que tu l'as déjà trouvée et vois ce que tu peux en tirer (*working backward*)
- Si ton problème est abstrait essaie d'examiner un cas concret.

- Essaie de résoudre d'abord un problème plus général. (C'est le *paradoxe de l'inventeur*, un plan plus ambitieux pourrait avoir de plus grandes probabilités de succès). Si tu ne peux pas résoudre ton problème essaie d'abord de résoudre un problème similaire. Arrives-tu à imaginer un problème en corrélation plus accessible ?

### La révolution commerciale

Entre le XII<sup>e</sup> et le XIV<sup>e</sup> siècle, la révolution commerciale est à son point culminant ; elle transformera l'Europe presque autant que la révolution industrielle du XIX<sup>e</sup> siècle. On achète tout. On vend tout ; on s'intéresse énormément aux produits du Proche Orient.[48] Depuis le temps des croisades, les riches vêtements des musulmans fascinent les rustres seigneurs féodaux, et on voit arriver tous les tissus dont nous conservons encore aujourd'hui les noms arabes, turcs ou persans : le *satin* (de la manière de dire en arabe Zaitun, aujourd'hui Quanzhou dans la province chinoise du Fujian), la *mousseline* (son nom dérive de la ville de Mossoul sur les rives du Tigre où les européens la trouvèrent la première fois, mais elle est originaire de la ville de Dacca au Bangladesh), le *taffetas* (du persan *taftah*, participe passé du verbe *taftan*, tordre, tresser tisser) ; les registres et les cartes de commerce vénitiens ou génois sont une source utile d'informations sur l'organisation matérielle des affaires et nous font entrevoir l'existence d'un vaste réseau d'intérêts, d'activités, de transports . Malheureusement les informations sur les personnes ne concernent que des litiges, des testaments ou des procès. On ne peut pas déduire grand chose de noms pris çà et là presque par hasard. En revanche, la structure des associations commerciales, appelées *colleganze* à Venise et *commende* dans les autres villes, révèle la relative ampleur des affaires internationales. Cette activité des marchands est largement confirmée par les Frères mineurs (franciscains) et les prédicateurs qui parlent souvent avec les personnes qu'ils rencontrent. En 1305, le franciscain Giovanni de Montecorvino (1246-1328) confie une lettre à un négociant vénitien ; il converse avec un autre vénitien à Tabriz en Perse, avec un toscan et plusieurs génois à Thana en Inde. En 1307 le pape Clément V, envoie sept frères franciscains avec la charge de consacrer Giovanni archevêque de Beijing. D'autres informations sur les voyageurs européens nous sont données par l'archéologie : il y a le cas d'une certaine Katerina Vilioni (?-1342) femme d'origine italienne, morte en Chine dans la première moitié du XIV<sup>e</sup> siècle, que nous ne connaissons que grâce à la découverte de sa pierre tombale, retrouvée en 1957 près de la ville chinoise de Yangzhou. Le frère mineur Odorico de Pordenone (1265-1331), visite en 1322 Yangzhou rapportant qu'il loge dans une communauté franciscaine et qu'il y a aussi, en ville, trois églises nestoriennes ; sa relation de voyage est conservée à la *Biblioteca Riccardiana* à Florence.

Francesco Balducci Pegolotti (env. 1310-1347) est un marchand florentin au service de la Compagnie des Bardi ; à ce titre il se rend à Anvers de 1315 à 1317. Il est directeur du siège de Londres de 1317 à 1321 et négocie personnellement avec le roi Edward II. Entre 1335 et 1343 il termine l'ouvrage qui le rend célèbre : *Le Livre des devisements des pays et des mesures de marchandises et autres choses que doivent savoir les marchands*, qu'on appelle habituellement : *Pratique du commerce*. Il y rédige un glossaire de termes italiens et étrangers de l'époque,

utilisés dans le commerce ; la *Pratique* décrit les villes connues des marchands italiens, l'importation et l'exportation depuis différentes régions, les traditions commerciales des différentes zones et une comparaison entre les valeurs des monnaies, des poids et des mesures. L'itinéraire le plus long que Balducci Pegolotti décrit est celui depuis Azov via Astrakhan, Khiva, Otrar et Kulja jusqu'à Beijing. Il met par écrit sur un gros *in-folio* les itinéraires détaillés que les marchands se transmettent. Il s'informe, dit-il, auprès des marchands qui ont fait le voyage en Extrême-Orient, et selon lui, le voyage en Chine est une chose assez normale. Ses renseignements viennent surtout des génois, car il utilise les unités de mesure génoises pour indiquer les frets et pour comparer les poids et les monnaies. Le manuscrit autographe ne nous est pas parvenu ; celui qui a survécu, conservé à la Biblioteca Riccardiana de Florence, a été complété le 19 mars 1472 par Filippo di Niccolao Frescobaldi. Balducci Pegolotti publia entre autre les premières tables numériques pour le calcul de l'intérêt composé.

Une figure importante pour l'histoire de la cosmographie est celle de Niccolò Da Conti (ou Nicolò de' Conti, 1395-1469) explorateur et marchand vénitien qui voyage en Inde et dans le Sud-est asiatique au début du XV<sup>e</sup> siècle.[48] Da Conti part de Venise en 1419 environ et s'installe à Damas où il étudie l'Arabe. Pendant 25 ans il voyage habillé en marchand musulman dans de nombreuses régions d'Asie, facilité en cela par sa pratique des langues et des cultures du monde islamique, ce qui lui permet aussi d'embarquer sur des bateaux de marchands islamiques. Da Conti traverse pour la première fois le désert pour rejoindre Bagdad, de là il descend le Tigre jusqu'à Bassora. Il navigue ensuite dans le Golfe Persique et se rend en Iran où il apprend le persan. Autour de 1421 il arrive à « Pedir », dans la partie septentrionale de Sumatra, où il reste un an, il s'informe sur les lieux, surtout sur ce qui concerne le commerce de l'or et des épices. De là, il continue son voyage, et après 16 jours de navigation il arrive à Tenasserim dans la péninsule malaise. Il appareille ensuite vers l'embouchure du Gange, visitant Bardhaman au Bangladesh et continue par terre jusqu'à Arakan, dans l'actuel Myanmar. Après avoir traversé la Birmanie, il part pour Java, où il passe neuf mois, avant de se rendre au Champa, dans l'actuel Vietnam. Il voyage en famille et retourne à Venise en 1444. Au cours de ses voyages, Da Conti abandonne le christianisme pour se convertir à l'Islam, et à son retour, le pape Eugène IV (1431-1447) lui impose comme pénitence de faire la relation de ses voyages à son secrétaire Gian Francesco Poggio Bracciolini (1380-1459). Ces récits de Niccolò Da Conti, consignés par écrit par Poggio en 1439, constituent une des meilleures descriptions de l'orient par un voyageur du XV<sup>e</sup> siècle. Ils sont inclus dans le livre IV de son *De Varietate Fortunae*; Poggio Bracciolini a le remarquable mérite de réhabiliter l'emploi de l'écriture *caroline minuscule* qui était tombée en désuétude, remplacée par l'écriture gothique, moins claire. C'est un acte décisif au siècle où va naître l'imprimerie : de fait, à la fin du siècle, les « plombs » c'est-à-dire les caractères typographiques sont faits en minuscule et non en gothique; de là viennent, aujourd'hui encore, nos caractères d'imprimerie. Quand donc, nous lisons à présent le caractère cursif, nous sommes en fait en train de lire les ouvrages, écrits à la main, par Poggio Bracciolini, *comme vous êtes en train de le faire maintenant*.

On rapporte que les récits des voyages de Niccolò Da Conti, qui circulent au début sous forme manuscrite, ont profondément influencé la compréhension géographique des régions autour de l'Océan Indien au milieu du XV<sup>e</sup> siècle. C'est un des premiers récits décrivant les îles de la Sonde et les îles des Epices; il contribue à revaloriser l'ouvrage de Marco Polo, auquel on attribuait auparavant peu de crédit. Ses récits encouragent sans doute les voyages d'exploration européens de la fin du siècle. Da Conti influence aussi la cartographie du XV<sup>e</sup> siècle, comme on peut le remarquer dans la *Mappa genovese* et dans le travail du cartographe Fra' Mauro, moine et cartographe italien, dont la Carte du monde de 1457 offre une des représentations les plus claires des terres alors connues. On rapporte que c'est justement Niccolò Da Conti qui en est la « *source digne de confiance* ». Fra' Mauro le cite dans une inscription sur sa carte, au sujet des voyages d'une « jonque d'Inde », au delà du Cap de Bonne Espérance et dans l'Océan Atlantique, autour de 1420, confirmant qu'il est possible de faire la circumnavigation de l'Afrique. Le livre de Da Conti est utilisé par divers explorateurs et voyageurs, tels Ludovico di Varthema, et Antonio Pigafetta qui naviguent autour du monde dans l'expédition de Magellan. On suggère que l'homme « du Catay » qui rend visite au pape Eugène IV, comme le décrit Paolo Toscanelli dans une lettre de 1474 à Christophe Colomb, peut être Niccolò Da Conti, dont on sait qu'il a rencontré le pape. La fréquence surprenante des voyages vers l'Extrême-Orient, surtout de la part de marchands italiens, montre que l'expédition de Marco Polo n'a pas du tout été isolée mais qu'elle n'est, au contraire, qu'un épisode, même pas documenté de façon fiable, dans un contexte de vastes et stables relations commerciales entre l'Europe et l'Asie aux XIII<sup>e</sup>-XV<sup>e</sup> siècles. Les conséquences sur la cartographies des régions de l'Est du continent eurasiatique sont remarquables, et améliorent la qualité des cartes géographiques. En revanche les connaissances sur la partie septentrionale du monde connu sont rares.

Figure 4. 3 La Carte Génoise (1457), d'auteur inconnu, contient les informations de Niccolò Da Conti qui voyage longtemps en Asie. Remarquez les bonnes proportions entre les différents continents. La fréquence des voyages vers l'Extrême-Orient surprend : au XIV<sup>e</sup> siècle, dans la ville chinoise de Yangzhou une communauté d'italiens est présente ; alors que le commerce avec l'Orient améliore grandement la qualité des cartes géographiques de ces terres, les connaissances de la partie septentrionale du monde connu sont, au contraire, rudimentaires. (Wikimedia Commons ; user PHGCOM)

La description cartographique de la Scandinavie qui se développe en Europe méridionale a une histoire très curieuse qui nous emmènera loin.[47] La Scandinavie n'a pas une tradition propre de réalisation de cartes et pendant des siècles les cartes européennes la représentent de manière plutôt élémentaire. Durant les XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> siècles apparaissent tout à coup des formes très bizarres dans l'angle nord-occidental des cartes européennes. Bien que leur-réalisme soit très variable, elles n'ont pas évolué vers de meilleures représentations durant ces deux siècles. Entre temps, les cartes d'autres parties du monde progressent vers une

meilleure adéquation à la réalité. Cette situation atypique concernant la Scandinavie prend fin tout à coup au début du XVI<sup>e</sup> siècle avec l'apparition de cartographes scandinaves connus.

La cartographie de ces régions est étudiée à fond par James Robert Enterline, auteur de *Erikson, Eskimos & Columbus : Medieval European Knowledge of America*. [47] Enterline soutient que l'explication rationnelle de cette situation insolite est à rechercher dans la divulgation d'informations d'origine esquimaude. Les esquimaux ont commencé leur migration en Alaska et, arrivés au Groenland, ils se décrivent eux-mêmes comme venant de la limite occidentale du continent. Les européens qui écoutent leurs récits, les interprètent comme le témoignage de leur provenance de Laponie, dans la Scandinavie septentrionale. Comme on présume qu'il y a une seule terre émergée, les savants européens pensent que les esquimaux ont voyagé vers l'est de l'Asie septentrionale. Le raisonnement des européens est que les norsemen en naviguant vers l'ouest ont rejoint le Groenland et là rencontré les présumés lapons. Le cartographe scandinave Claudius Clavus (1388- ?) pense que les esquimaux sont des Caréliens provenant de la Mer Blanche. Claudius Clavus Suartha, connu aussi sous le nom de Nicholas Niger, en danois Claudius Clausson Swart (à ne pas confondre avec Christophe Clavius, jésuite et mathématicien du XVI<sup>e</sup> siècle) est un géographe danois, considéré comme le premier cartographe scandinave. En 1412-13 à l'âge de 25 ans il commence à voyager en Europe et onze ans plus tard on le retrouve à Rome. On pense qu'il a voyagé jusqu'à une latitude nord de 70°10'. A Rome il devient l'ami du cardinal Giordano Orsini et du secrétaire du pape Gian Francesco Poggio Bracciolini, qui est un de ceux qui travaillent, comme nous l'avons vu, à l'actualisation de l'ancienne cartographie. Clavus contribue à une description plus réaliste des pays nordiques, en particulier l'Islande et le Groenland, et il est sans doute le premier cartographe à localiser le Groenland sur une carte. Malheureusement, la majeure partie de son travail, y compris deux plans, est perdue, mais une copie est conservée par les cartographes allemands Donnus Nicholas Germanus et Henricus Martellus Germanus, qui ont eu accès aux notes originales. Selon eux, Clavus aurait visité le Groenland en 1420, donc juste après le dernier contact connu d'un bateau avec cette terre en 1408. Deux manuscrits de mathématiques, contenant la seconde carte du plan du Groenland réalisée par Claudius Clavus durant son voyage au Groenland, ont été retrouvés à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle par les savants danois Bjönbo et Petersen.

Les populations que les norsemen rencontrent au Groenland sont les Thulés ou *Proto-Inuits*, les ancêtres de tous les Inuits modernes, arrivés en Alaska autour de 500 ap. J.-C. et à Nunavut au Canada en l'an 1000 ; ensuite vers le XIII<sup>e</sup> siècle, un groupe atteint le Groenland. Le nom « Thulé » dérive de la ville de Thulé dans le Groenland nord-occidental (l'actuel Qaanaaq), où on a retrouvé pour la première fois des vestiges archéologiques de cette civilisation. Les liens entre Thulé et les Inuits sont à la fois biologiques, culturels et linguistiques. L'historiographie du XIX<sup>e</sup> siècle pense que les rapports entre les norsemen et les esquimaux qui viennent d'arriver au Groenland sont hostiles et qu'il y a peu de contacts entre eux. Cette idée persiste au cours du XX<sup>e</sup> siècle, mais ensuite différents historiens rejettent la notion de rapports généralement hostiles et concluent que, bien que des relations hostiles aient certainement eu lieu, le climat général était neutre et parfois

positif. Au XIII<sup>e</sup> siècle les esquimaux rencontrés par les norsemen, sont donc en pleine migration à travers l'Arctique, depuis l'Alaska au Groenland. Ces esquimaux, appartenant à la culture Thulé, peuvent montrer aux norsemen comment vivre pendant l'hiver arctique et où trouver des terrains de chasse. A leur tour les norsemen peuvent transférer aux Thulés nombre de technologies que ceux-ci introduisent dans leur vie quotidienne. Les deux populations ont donc pu coexister pendant plusieurs générations au Sud du Groenland, et on trouve des traces de mots d'origine norroise dans le dialecte esquimau.

Figure 4.4 Les cultures arctiques du X<sup>e</sup> au XVI<sup>e</sup> siècle. La carte montre les différentes civilisations qui ont vécu au Groenland, Labrador, Terre Neuve et les îles arctiques du Canada.(Wikimedia Commons ; Masae)

Il est possible que les esquimaux Thulé aient à l'occasion partagé avec les norsemen leurs connaissances géographiques sur l'Amérique, acquises lors de leur récente migration. Ces notions incluent plusieurs techniques de dessin de cartes primitives, qui de manière surprenante ne font pas partie de la culture des norsemen. La capacité de dessiner des simples cartes est un patrimoine commun à nombre de cultures nomades, car ces connaissances sont une aide à la survie. Les Thulés du moyen âge sont d'abord un peuple de la côte qui vit de la chasse des mammifères et connaît chaque crique de la côte. La difficulté de recréer une carte à l'échelle correcte vient du fait qu'une grande partie de l'information est mémorisée sous forme d'un itinéraire linéaire. On sait que les esquimaux du Groenland font des cartes taillées dans le bois, représentées de manière linéaire. On a pas de preuves pour étayer l'hypothèse que les esquimaux ont appris à faire des cartes au contact des européens, après l'arrivée de Christophe Colomb. Nombre de cartes médiévales, aux représentations incongrues, de la Scandinavie contiennent des informations qui proviennent plus probablement des esquimaux que de sources norsemen.[47] En fait beaucoup pourraient être le résultat de contacts directs de cartographes européens avec des esquimaux arrivés en Europe et directement interviewés, circonstance avérée en particulier pour plusieurs des premières cartes qui ressemblent à la région de l'Alaska d'où provient la culture de Thulé. Ceux qui résident dans les colonies noroises au Groenland transmettent des informations à l'Europe sous forme de cartes, descriptions de voyageurs et d'autochtones, durant le siècle qui précède Colomb. Cela pourrait expliquer le développement, à l'époque, des idées des européens sur la proximité entre l'Asie et l'Occident, et donc la genèse de *la théorie de l'atlantique étroit*.

Alors que les contacts de Leif Eiriksson dans le Vinland cessent avec l'abandon de ces terres vers le XI<sup>e</sup> siècle, les contacts des Groenlandais avec les esquimaux au début de la Renaissance pourraient bien avoir provoqué une révolution géographique en Europe. Ensuite, l'Europe perd contact peu à peu avec les norsemen du Groenland à cause du refroidissement progressif du climat, et on n'enregistre plus des contacts officiels dès le début du XV<sup>e</sup> siècle. Mais beaucoup d'indices nous montrent que les norsemen ont continué à y vivre et que les européens ont fait des voyages au Groenland pendant encore un siècle. On a retrouvé des vêtements de style européen dans des sépultures groenlandaises de la

fin du XV<sup>e</sup> siècle. Il se peut que soient arrivées en Europe de vagues informations sur plusieurs territoires de l'ouest, à travers différents canaux non officiels et non enregistrés soit avant, soit après 1400. Que deviennent ces informations une fois arrivées en Europe ? Une partie du travail des cartographes, au moins à la fin du moyen âge, consiste à incorporer de nouvelles données quand ils actualisent les cartes. La seule façon dont ces nouveaux éléments peuvent être situés et compris en Europe est de les relier logiquement aux notions déjà acquises. Mais les connaissances géographiques sur la Scandinavie sont encore insuffisantes ; elle représente un vide pour les cartographes européens de référence. Supposons que, par hasard, une carte avec des informations sur le continent américain arrive par l'intermédiaire des groenlandais dans les mains des cartographes européens, ces informations arriveraient de Scandinavie. Il est donc inévitable que le cartographe saute à la conclusion que les nouvelles informations se réfèrent à la géographie à peu près inconnue de la région scandinave. Il en résulte donc un profil de la Scandinavie pas très réaliste ; il a même quelques ressemblances avec des territoires nord-américains. Enterline formule l'hypothèse que l'angle nord-occidental des cartes du Monde Ancien semble avoir assimilé, en différentes occasions, un profil qui tire ses origines du parcours qui, partant du Labrador, le long du Passage du Nord-ouest alors ouvert, arrive jusqu'à l'Alaska. Il reflèterait donc la route d'émigration des Thulés, le tout sous l'étiquette de « Scandinavie ». Il est raisonnable d'imaginer qu'une nouvelle information géographique ait été associée au lieu de sa provenance immédiate : si ces données proviennent de la Scandinavie, auraient conclu les cartographes européens, elles doivent se référer à cette région et à celles limitrophes. Il existe un grand nombre de cartes d'avant 1492 qui conservent les traces des contacts entre les norsemen et les territoires de l'Amérique ou avec des autochtones américains.[47] Mais les norsemen ne se rendent pas compte qu'ils savent quelque chose sur un nouveau continent. Dans une douzaine de cartes du monde connu, les côtes arctiques de l'Eurasie montrent de nombreux détails, quoique incorrects. Les européens n'étaient jamais allés dans l'Eurasie arctique, ni ne connaissaient de cartes sur ce sujet. On pourrait expliquer ces détails de représentations comme des fantaisies, mais il pourrait aussi y avoir une autre interprétation. Selon Enterline donc, beaucoup de ces détails correspondent exactement aux caractéristiques de la côte arctique de l'Amérique du Nord, et non à celles du bloc eurasiatique.

Les correspondances cartographiques sont un terrain très risqué, et discrédité aux yeux des historiens par les abus d'écrivains populaires qui aiment propager des conclusions sensationnelles et invraisemblables. Mais les exemples cartographiques exposés par James Robert Enterline sont si nombreux qu'ils témoignent d'une attitude répandue, qui demande à être expliquée. Pour soutenir ses hypothèses, Enterline rapporte, en outre, de nombreux itinéraires de voyageurs et des descriptions géographiques de l'Amérique de l'époque précédant Colomb. Les cartes du monde dessinées au moyen âge en Europe correspondaient à des descriptions rapportées (certains savants préfèrent le mot *cartogramme*), plus qu'à des représentations rigoureuses et dotées de grilles de coordonnées selon les critères de Ptolémée. Alors que la carte dite *Yale Vinland Map* est l'objet depuis plusieurs décades d'études et de critiques sur ses origines incertaines, il existe d'autres documents de provenance sûre, catalogués depuis des siècles dans les

bibliothèques les plus importantes. On peut y analyser la *distorsion systématique* causée par le sous-entendu dans l'identification des continents.

Une des cartes parmi les plus intéressantes à ce sujet est celle dessinée par le vénitien Abertinus de Virga entre 1411 et 1415, connu aussi par une carte de la Méditerranée de 1409.[49] La carte a été retrouvée en 1911 dans un magasin d'antiquités à Srebrenica en Bosnie, par Albert Figdor, collectionneur de cartes. Elle a été analysée par le professeur Franz von Weiser de l'Université de Vienne ; on a fait des photographies authentiques conservées aujourd'hui à la British Library. La carte géographique, mise aux enchères en 1932, fut soudainement retirée par les propriétaires : se sont-ils rendus compte qu'elle valait beaucoup plus cher ? Puis, pendant l'occupation nazie, elle fut sans doute volée et depuis on en a perdu la trace. La carte est circulaire d'un diamètre de 410 mm et elle est dessinée sur un parchemin qui comprend aussi un calendrier et deux tables. Une des tables servait à calculer les phases lunaires, l'autre la date de Pâques. Dans l'Europe septentrionale on trouve « Noverca », la Norvège, de dimensions énormes ; c'est sans doute une représentation du Groenland et peut-être des côtes nord-orientales du continent américain. L'omission de l'Islande démontre, comme le reste de la carte, que de Virga n'a pas basé son travail sur les concepts de la *Géographie* de Ptolémée qui commençait à être diffusée en Europe ; il n'y a aucune raison valable de douter de son authenticité. De toute façon, si on décide de n'admettre aucune carte, preuve de la méconnaissance des territoires nord-américains au moyen âge, elle reste toujours un témoignage solide de documents écrits, en plus, bien entendu, du site archéologique de l'Anse aux Meadows. L'écrit le plus ancien du Vinland enregistré qui a survécu est celui d'Adam de Brème (*Adam Bremensis*, avant 1050-1085), historien allemand qui a vécu dans la deuxième moitié du XI<sup>e</sup> siècle. Son œuvre la plus célèbre est la *Gesta hammaburgensis ecclesiae pontificum*.[50] L'ouvrage est en quatre volumes, la première édition remonte à 1075-1076 et raconte l'histoire de l'archidiocèse de Hambourg-Brème et des îles du Nord. Dans les trois premiers volumes on raconte surtout l'histoire de l'archevêché, alors que le dernier est plus centré sur la géographie, l'histoire et les coutumes de la Scandinavie. Dans le quatrième livre de sa Geste, *Descriptio Insularum Aquilonis* (Description des îles septentrionales, l'auteur fait allusion au Vinland, portion d'Amérique découverte par les norsemen islandais (identifiée comme Terre Neuve, Canada) ; il la décrit comme une grande île découverte par « beaucoup de monde » et riche de vignes. Pour écrire la *Descriptio*, il rend visite au roi danois Sven Estridson qui a eu connaissance de terres septentrionales et qui lui parla des « îles » découvertes par des marins norsemen, loin dans l'Atlantique dont le Vinland était la plus éloignée ; Adam de Brème a été le premier à écrire sur cette découverte, survenue quelques décennies avant la rédaction de son livre et qui est bien attestée dans les sagas islandaises.

« *Praeterea unam adhuc insulam recitavit a multis in eo repartam oceano, quae dicitur Winland, eo quod ibi vites sponte nascantur, vinum optimum ferentes* ».

Le témoignage d'Adam est de la plus grande importance, non seulement parce que c'est le plus ancien témoignage écrit des découvertes des norsemen en Amérique, mais aussi parce qu'il est totalement indépendant des écrits islandais et se fonde entièrement sur une tradition norroise qui, à cette époque-là, était encore

récente. Au début du XIV<sup>e</sup> siècle, une encyclopédie géographique, *Geographica Universalis*, est compilée à Malmesbury Abbey en Angleterre, et à son tour utilisée comme source d'un des ouvrages de divulgation anglais de grande diffusion quelques années plus tard, le *Polychronicon* de Ralph Higden (env. 1280-1363). Cet ouvrage est très populaire au XV<sup>e</sup> siècle ; c'est un traité standard sur l'histoire générale dont on connaît l'existence de plus d'une centaine de manuscrits. Ces deux ouvrages, avec Adam de Brème comme source possible, ne sont pas clairs sur la localisation de ce qu'ils appellent Wintland : le moine de Malmesbury le situe dans l'océan, mais à l'est de la Norvège, tandis que Higden le place à l'ouest du Danemark, mais donne une distance erronée. Les copies du *Polychronicon* incluent habituellement une carte sur lesquelles le Wintland est indiqué dans l'Océan Atlantique, près de l'Islande, mais encore beaucoup plus proche de la Scandinavie qu'il ne l'est en réalité.

Figure 4. 5 Carte du vénitien Abertinus de Virga (1411-1415), découverte en 1911 dans un magasin d'antiquités à Srebrenica, en Bosnie. En Europe septentrionale on peut lire Norveca (Norvège), représentée par d'énormes proportions : c'est probablement une représentation du Groenland et peut-être des côtes nord orientales du continent américain. Elle pourrait contenir des informations géographiques sur ces terres provenant des Esquimaux-Thulé. (Wikimedia Commons ; user PHGCOM)

Les textes islandais de cette période sont en revanche plus corrects ; ils donnent une représentation claire des régions septentrionales comme les ont connues les explorateurs norsemen : au nord de l'Islande il y a une plaine aride que nous pensons être la calotte polaire qui s'étend du Biarmeland (Russie septentrionale) à l'est de la Mer Blanche, au Groenland, puis encore à l'est et au sud il y a successivement l'*Helluland*, le *Markland* et le *Vinland*. Les islandais ne savent pas jusqu'où s'étend le Vinland au sud et supposent qu'il peut être aussi éloigné que l'Afrique. Les norsemen pensent qu'un grand isthme s'étend de la Norvège au Groenland en en faisant une seule terre. On croit que le Groenland s'étend jusqu'au Vinland qui, à son tour, se prolonge vers le sud et continue vers l'est pour presque atteindre l'Afrique. *L'Historiae Norwegiae* [51] compilée autour de 1200 ne se réfère pas directement au Vinland et tente de concilier les informations issues du Groenland avec les sources d'origine continentale européenne. Dans ce texte, le territoire du Groenland s'étend tellement qu'il « *touche presque les îles africaines* » Les chroniques islandaises enregistrent une autre tentative de visiter le Vinland depuis le Groenland, plus d'un siècle après les voyages racontés dans la saga. En 1121, l'évêque islandais Erik Knupsson, dont nous avons déjà parlé, installé au Groenland depuis 1112, « *alla voir le Vinland* ». On a rien de plus sur lui et trois années plus tard un autre évêque, Arnald, est envoyé au Groenland. Aucun écrit enregistré, à part des inscriptions sur des pierres, n'a survécu au Groenland, si bien que la référence suivante à un voyage provient encore des chroniques islandaises. En 1347 un bateau arrive en Islande après avoir perdu sa route, du *Markland* vers le Groenland, avec une cargaison de bois. Ce

témoignage veut dire que les groenlandais ont continué à utiliser le *Markland* comme réserve de bois pendant plusieurs siècles.

Colomb a-t-il vu ces documents ? Peut-être ou peut-être pas. Mais sa conception des terres à l'ouest est inspirée par les savants des générations précédentes qui les avaient vues.[47] Il existe des preuves que de telles informations sont disponibles en Europe méridionale de son temps et on peut donner plusieurs preuves que Colomb a pu y avoir accès. Les indices suggèrent que les informations géographiques des esquimaux au sujet d'un vaste continent américain trouvent leur chemin vers les cartes médiévales européennes par l'intermédiaire des norsemen du Groenland. Si la moitié du XV<sup>e</sup> siècle est l'époque où les savants doivent assimiler les nouveautés provenant des contacts avec les norsemen, la dernière partie du siècle est au contraire le temps où commencent à agir les hommes pragmatiques. C'est une période riche en projets et en voyages. Le Portugal, par exemple, signe une alliance avec le Danemark dans le but de faire des voyages d'exploration en commun au temps de Henri le Navigateur. Il a cherché une voie vers l'Orient en passant au Sud de l'Afrique. Les portugais reconnaissent le rôle des danois en incluant des navigateurs et des commandants scandinaves dans plusieurs de ces voyages. En 1472 le roi Christian I du Danemark est persuadé par le portugais Alphonse V d'explorer les zones au-delà du Groenland. Le projet montre au moins qu'on sait qu'il y avait près du Groenland des terres qui méritent d'être connues. Les rares données sur cette expédition suggèrent qu'elle est composée de plusieurs navires, et est peut-être commandée par un pilote norvégien Johannes Scolvus ; le portugais envoyé comme observateur est le gentilhomme Joao Vaz Corte-Real. Il nous reste très peu de choses sur les activités et les résultats de cette expédition. En 1474 Corte-Real devient gouverneur d'une partie de l'île de Terceira dans les Açores, comme récompense pour avoir découvert *Terre Nova do Bacalhau* (littéralement Terre Neuve de la morue). On suppose que cette île, d'ailleurs inconnue, serait Terre Neuve au Canada. Que l'expédition ait atteint le continent américain n'est pas prouvé, mais on ne peut le réfuter non plus, à cause de la rareté des documents. Il faut cependant mentionner que, à Terre Neuve, au large de la Péninsule Avalon se trouve une île inhabitée de 5 km, *Baccalieu Island*, nom dérivé du portugais *bacalhau*. Toujours dans cette zone, il existe encore aujourd'hui *Portugal Cove - St. Philip's*, une petite communauté rurale sur la côte, fondée par les portugais, un des premiers villages européens du Nouveau Monde. Pourquoi tant d'intérêt portugais pour ces régions de l'Atlantique septentrional ? Cherchaient-ils peut-être une voie pour les Indes autre que celle contournant l'Afrique ? Il est vraisemblable que Corte-Real ait joué un rôle en 1486, en encourageant l'expédition Dulmo-Estreito qui se propose justement de partir des Açores pour *chercher et trouver une grande île ou des îles ou la côte du continent*. [47] Bien que les contacts européens avec le Groenland soient interrompus en 1420, durant les années 80 et 90 du XV<sup>e</sup> siècle on enregistre au moins six expéditions indépendantes destinées à explorer le Nord et l'Ouest. Plusieurs de ces expéditions sont sans doute motivées par des informations provenant des norsemen et transmises par eux. Il serait irréaliste de ne pas considérer l'éventualité que *toute* cette attention pour l'Occident est motivée par ces informations, directement ou indirectement.

Le cadre que nous sommes en train de tracer semble montrer qu'il n'y a pas eu de *première* découverte européenne, pas même de la part des norsemen ; il y eut plutôt une diffusion graduelle en Europe continentale de notions esquimaudes de terres situées à l'est du Groenland, suivie par des tentatives européennes d'aller y voir directement. Ce n'est que bien plus tard que quelqu'un se rendit compte que ces terres *n'étaient pas* l'Asie . Il semble donc que le voyage de Colomb soit à replacer dans une perspective beaucoup plus large : celle de la conviction progressive de l'existence de terres occidentales relativement proches de l'Europe et de l'Afrique. Il faut plusieurs décades après 1492, avant que la majeure partie des géographes se rende-compte qu'il existe un continent, l'Amérique, distinct de l'Asie. Jusque-là les européens supposent que toutes les terres de l'autre côté de l'océan doivent être l'Asie. Même quand on en vient à admettre qu'il s'agit d'un nouveau monde, on ne le connaît que vaguement, en théorie, comme une idée confuse associée à la traditionnelle conception des *antipodes*. Il est possible que les trois différents objectifs de Colomb : raccourci pour l'Asie, nouvelles terres et recherche des antipodes, soient en réalité des formulations différentes d'un objectif unique imprécis, mûri confusément dans le climat culturel que nous venons de décrire. De la demi douzaine de livres que Colomb a lu à fond et qui ont pu avoir une certaine influence sur lui, il a dû en avoir quatre entre les mains avant 1492. De ces textes essentiels aucun n'est plus important que la *Géographie* de Ptolémée, pour Christophe Colomb et en général pour la géographie de son temps. En Italie et au Portugal où Ptolémée a eu la plus grande diffusion, l'autorité de la *Géographie* est considérée comme supérieure à tout autre texte. Colomb adopte le principe ptolémaïque de construire les cartes sur la base d'une grille, et de déterminer la position des lieux moyennant des coordonnées de longitude et de latitude. Mais comme on n'a pas conservé de cartes dessinées par lui, on ne sait pas mesurer sa fidélité aux critères ptolémaïques. L'attitude de Colomb envers Ptolémée est un indice intéressant pour son mode de raisonnement, et ses connaissances scientifiques à une époque où l'expérimentation commençait à rivaliser avec la tradition comme source d'autorité. Colomb a un profond respect pour les textes et nourrit probablement à leur égard une sorte de crainte révérencielle. Mais il sait qu'ils ne peuvent répondre à son besoin de connaître. D'un autre côté, l'étude et la connaissance des textes et l'acceptation de l'autorité, même celle de Ptolémée, quand ils conviennent à ses objectifs, contribuent à faire mûrir ses idées. Les notes de Colomb à la *Géographie* de Ptolémée n'ont pas été conservées, mais on peut leur donner une place essentielle dans la formation de ses notions géographiques.[43]

Colomb a les lacunes typiques de l'autodidacte, les défauts qui naissent de l'assimilation de connaissance au hasard et sans guide. Il lit avidement mais sans esprit critique ; il acquiert au fur et à mesure une masse de notions, mais il ne sait jamais s'en servir de la manière la plus profitable. En raisonnant, il arrive d'un bond, avec des preuves très minces, à des conclusions bizarres, qu'une préparation plus équilibrée lui aurait appris à éviter. Il a une obsession en choisissant ses lectures : elles doivent conforter ses théories; il écarte et déforme tout ce qui ne s'y conforme pas. Une autre source de Colomb est *le Million* de Marco Polo (1254-1324). Le texte du voyageur vénitien est ancien et très lu au temps de Colomb, mais son autorité est controversée. Ce texte n'apporte pas le genre de poids que Colomb aimerait invoquer, caractérisé qu'il est par le goût du merveilleux, et plein

d'exagérations, mais dans ses choix de témoignages, Colomb n'a pas assez d'esprit critique. Marco Polo rapporte que, à 1500 milles de la Chine, se trouvait l'île de *Cipangu*. C'est la première nouvelle arrivée en Europe sur l'existence du Japon, mais sa véracité est légitimement mise en doute. Colomb s'agrippe à *Cipangu* comme à une bouée de sauvetage et lors de sa première traversée il ne se dirige pas vers elle au début, mais il modifie sa route dans l'espoir de la trouver. Une fois dans les Caraïbes, il la cherche à plusieurs reprises et parfois il pense l'avoir trouvée. Mais les affirmations de Marco Polo sur l'existence d'hommes avec la queue, ou la tête de chien, justifient sa réputation d'affabulateur. On ne peut au contraire prouver que Colomb ait lu Strabon, mais le cartouche d'une carte attribué à son frère Bartolomeo, connue des écrivains du XVI<sup>e</sup> siècle, cite le géographe grec, avec Ptolémée, Plin et Isidore.

A plus d'un titre Christophe Colomb doit apparaître comme un personnage plutôt excentrique. Il affirme entendre des voix célestes, met dans l'embarras la cour des souverains espagnols, en se présentant régulièrement en habits de franciscain, une fois même enchaîné, il s'adresse à la reine dans un langage galant, à vous laisser bouche bée : « *Je vous ai donné à Barcelone les clés de mes désirs* ». Il semble donc que Colomb sait comment attirer l'attention d'Isabelle mais on ne peut pas prêter foi à ce que lui et ses hagiographes disent des réactions de la souveraine. Il est obsédé par la légende des amazones, notant chaque référence qu'il trouve ; par deux fois, dans ses explorations du Nouveau Monde, il croit avoir rencontré ces créatures ou les avoir manquées de peu. La recherche des amazones fait-elle partie de son objectif de défense et d'expansion de la Chrétienté ? Ou voit-il en elles une source d'images rhétoriques utiles à ses conversations avec la reine de Castille, souveraine consciente d'avoir un fort caractère ? Il serait facile d'excuser ce comportement, ou même de s'en réjouir comme de bizarreries qui souvent accompagnent le génie, mais il contribue à nous donner l'image d'une personnalité difficile à déchiffrer et sous certains aspects, incompréhensible.[43]

Les *Historie* de Ferdinando Colombo (1488-1539), fils et biographe de Christophe Colomb, traitent au Chapitre IX des « indices » qui contribuèrent à convaincre le futur Amiral à voyager vers les Indes, et seraient la « troisième raison » de la découverte.[52] Il est possible que les arguments de la « troisième raison » aient été les premiers indices et les plus importants sur lesquels s'est basé le navigateur génois pour concevoir son plan de la traversée de l'Atlantique. Voici quelques-uns des indices que rapportent les *Historie* de don Fernando. Pietro Correa, beau-frère de Colomb, lui raconte que, à Porto Santo, dans l'archipel de Madère à 860 km de Lisbonne, il a vu un bout de bois de bateau, très bien travaillé, arrivé par vents d'ouest. La mer a déposé aussi plusieurs grosses cannes qui, d'un nœud à l'autre, peuvent contenir « neuf carafes de vin ». Le roi du Portugal Joao II, discutant de ces cannes avec Colomb lui en montre quelques-unes. Il exclut qu'elles viennent d'Afrique car elles ont été ramassées sur des plages de l'Atlantique quand les courants venaient de l'ouest. Plusieurs habitants des Açores rapportent à Colomb que, quand le vent souffle longtemps du ponant, la mer rejette des pins sur ces îles, surtout à Graciosa et Fayal. Les habitants des Açores disent aussi que dans l'île de Flores, une des plus à l'ouest, la mer a rejeté sur la plage deux corps d'hommes morts, au visage très large et d'aspect différent de celui des européens. En citant la découverte de ces corps, Fernando ne mentionne pas une

annotation de son père sur deux cadavres charriés dans la mer à Galway (Irlande) par les courants marins d'occident.[42] Il est probable que les *Historie* ne rapportent pas tous les indices recueillis par Colomb, et il est difficile de savoir comment interpréter ces témoignages. De toute façon l'attention de Colomb pour les preuves matérielles anormales pourrait être rapprochée de l'esprit qui, un peu plus tard, amènerait à la création des *Wunderkammern* (Cabinets des merveilles), expression allemande pour nommer des espaces particuliers où, du XVI<sup>e</sup> au XVIII<sup>e</sup> siècle, les collectionneurs conservaient d'habitude, leurs collections d'objets extraordinaires par leurs caractéristiques intrinsèques et extérieures. Les *Wunderkammern* furent un phénomène typique du XVI<sup>e</sup> siècle, mais ils ont leur origine au moyen âge, et peuvent être considérés comme des embryons de musées. C'est aux Açores que Colomb recueille les indices les plus importants, relatés par don Fernando. Indices qu'il évite toutefois de citer. Dans cet archipel, Colomb apprend que là, n'est pas le bon parallèle pour le départ, parce qu'il serait repoussé par les vents. Il comprend en revanche que c'est sur ce parallèle que se trouve la voie du retour. Il partira donc des Canaries, mais c'est peut-être l'unique choix possible pour une expédition dans l'Atlantique sous le drapeau espagnol. En réalité en 1487 il y a la tentative du portugais Joao Afonso do Estreito et du flamand Ferdinand von Olm (Fernaõ Dulmo) de faire un voyage de 40 jours vers l'île légendaire de *Antillia*. On pense que l'expédition Dulmo-Estreito est effectivement partie, mais le silence des chroniques portugaises portent à croire que ce fut un échec total. [43] La cause de cet échec est son point de départ : Les Açores. A la latitude des Açores, les vents et les courants rendent très difficile la navigation vers l'ouest. Christophe Colomb, donc, découvre non seulement l'Amérique, mais la route d'aller et de retour, entre l'Europe et le Golfe du Mexique. Cela vaut la peine de remarquer que la durée du voyage prévue par l'expédition Dulmo-Estreito est de 40 jours, pratiquement autant que celui de Colomb en 1492. Faut-il interpréter cette coïncidence comme étant totalement fortuite ou est-ce un indice que la *théorie de l'Atlantique étroit* localise justement ces terres occidentales à cette distance, et avec raison ?

A Palos, Christophe Colomb rencontre le père Antonio de Marchena, un franciscain qui est aussi cosmographe. Il aide Colomb à obtenir une audience auprès de la cour et conseille le Navigateur. Il est difficile avec peu de documents d'esquisser avec précision le rôle du père Marchena.[42] Il est possible que Colomb ait raconté beaucoup de choses au franciscain, et n'en ait parlé à personne par crainte de révéler trop de détails sur ses projets. Il ne parlera pas, par exemple, de son expérience islandaise, ni des cartes de Toscanelli, ni des routes d'aller et retour auxquelles il pensait. Peut-être qu'aux savants qui devront juger son projet, il donnera d'autres arguments, basés sur des textes classiques et sur les Écritures, mais pas ses propres convictions. Marchena sera toujours aux côtés de Colomb dans les moments les plus difficiles des sept années qui vont de l'arrivée à Palos au premier voyage de découverte, et Colomb écrit « *Je ne trouvai jamais aide de personne, sauf du père Antonio de Marchena, après l'aide de Dieu éternel* ». Le religieux utilise aussi tous ses contacts dans l'ordre des franciscains, afin de permettre à Colomb d'être écouté à la cour de Castille.

Comme Colomb hésite entre trois objectifs possibles, îles occidentales, route pour l'orient ou recherche des antipodes, il semble qu'il n'a pas une idée précise

sur ce qu'il se propose de découvrir, mais la ferme détermination de découvrir quelque chose. En 1492 Colomb s'occupe encore de rechercher des « îles et des terres » ; mais au cours de cette année-là, à ce qu'on en déduit des sources, il cherche exclusivement une route rapide pour l'Orient.[43] Tout ceci est cohérent avec les préparatifs de Colomb : embarquement d'un interprète oriental et lettres de créances implicitement destinée au souverain de Chine. Reste le fait que les documents de sa formation intellectuelle ne permettent pas de comprendre quand et comment il détermina son objectif. En 1492, ou un peu avant, le but du projet transatlantique fut réduit. Les Antipodes et les îles inconnues sortent de scène et on parle seulement d'une route rapide pour l'Asie ; on peut penser à une convergence entre l'objectif asiatique et le succès, si longtemps attendu, de la recherche de protection et de fonds nécessaires. Il est assez légitime de présumer que personne à la cour de Ferdinand et Isabelle n'avait très à cœur en 1492 de découvrir d'autres îles dans l'Atlantique, peut-être inintéressantes et difficiles à coloniser; en tout cas il est plus urgent d'installer des colons castillans dans les terres de l'émirat de Grenade, qui vient d'être conquis. Et puis la découverte des Antipodes ne laisse prévoir aucune possibilité de profits. Seul l'Orient avec ses marchés peut retenir l'attention de la cour.

Le départ a lieu le 2 août 1492 de Palos de la Frontera avec un équipage de 88 hommes au total, selon le calcul le plus vraisemblable dont nous disposons. Après une escale d'environ un mois aux Iles Canaries, à La Gomera, pour du ravitaillement et des modifications de voilure, les trois navires reprennent le large le 6 septembre. Poussées par les alizés, dont Colomb a eu l'intuition, les caravelles naviguent pendant un mois sans que les marins n'aperçoivent de terre. Le 11 octobre un marin pêche une fleur fraîche dans la mer ; puis on commence à voir flotter des rameaux et des végétaux, et seule la proximité d'une terre émergée peut justifier ces trouvailles. La nuit du 11 octobre, comme le rapporte ensuite le livre de bord, Colomb dit qu'il est convaincu d'avoir entrevu dans l'obscurité, dans le lointain, une lumière, « *como una candelilla que se levava y se adelantaba* » (comme une petite chandelle qui se levait et s'agitait). Finalement à deux heures, dans la nuit du 12 octobre 1492, Rodrigo de Triana, à bord de la *Pinta* aperçoit la terre : ils ont atteint l' « Asie ».

A ce moment-là, à des milliers de km de distance, en Pologne, vit un garçon de dix-neuf ans destiné à promouvoir une autre révolution : Nicolas Copernic.

## 2 | La révolution Copernicienne

L'an 1453 marque la fin de l'Empire Byzantin et avec lui, celle du Moyen Age. Constantinople a été conquise par les musulmans et elle cesse d'être le centre de la culture grecque. Durant les décennies précédant la fin de l'Empire Byzantin, les savants grecs commencent à émigrer en occident, surtout en Italie. La langue grecque est alors de nouveau étudiée dans les universités; les dialogues de Platon, inconnus pour la plupart au Moyen Age, sont disponibles depuis un certain temps et exercent une profonde influence. Bien que la tradition platonicienne tende à

l'abstraction et soit étrangère à l'observation systématique du monde naturel, elle est imprégnée d'une vision mathématique et harmonique de la nature et du cosmos.

C'est le courant néoplatonicien qui se diffuse en Europe. Le *néoplatonisme* est cette interprétation particulière de la pensée de Platon, élaborée à l'âge hellénistique, qui devient la principale école de philosophie antique à partir du III<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. Par convention, on fait commencer le néoplatonisme avec l'activité de Plotin de Licopole (205-270) ; il étudie à Alexandrie d'Égypte, où il est l'élève de Ammonius Sacca. Là, il assimile les ferments culturels de la philosophie grecque et de la mystique orientale, s'éloignant du platonisme d'influence byzantine, resté plus fidèle au Platon de la tradition.

Mais une véritable reprise des idées platoniciennes a lieu durant l'Humanisme et la Renaissance ; elles arrivent à caractériser presque toute la philosophie de la Renaissance, période où elles sont soumises à des déformations hermétiques, magiques et ésotériques. La renaissance du néoplatonisme a certes été favorisée par l'influence de la culture byzantine ; mais la philosophie de la Renaissance ne s'est pas limitée à recevoir le platonisme grec, elle l'a recomposé en l'intégrant non seulement au néoplatonisme déjà présent dans le milieu occidental, mais aussi à l'aristotélisme apporté par les arabes. Les idées de Platon, Aristote et Plotin se rejoignent donc à Florence, berceau de l'Italie de la Renaissance. Le néoplatonisme connaît alors une remarquable diffusion dans presque tous les milieux culturels, même en dehors des écoles et des académies. Ce sont surtout Nicolas de Cues, Ficin et Pic de la Mirandole qui contribuent à sa grande renaissance. Marsile Ficin (1433-1499) en particulier, anime l'Académie Néoplatonicienne, fondée à Florence en 1459 selon la volonté de Côme de Médicis, dans la Villa des Médicis de Careggi. Domenico Maria de Novare (1454-1504), ami de Copernic et son professeur à Bologne, est étroitement lié aux platoniciens florentins qui traduisent les œuvres du philosophe et mathématicien Proclus (412-485) et autres auteurs de son école. Novare est un des premiers à critiquer la théorie des planètes de Ptolémée par une argumentation néoplatonicienne, retenant qu'un système d'une telle complexité ne peut représenter le vrai ordre mathématique de la nature. C'est donc dans ce climat culturel que se forme Copernic, auteur d'un ouvrage qui, sans être un texte révolutionnaire, provoque une révolution. Le traité de Copernic représente en même temps l'apogée d'une tradition passée et la source d'une tradition future ; dans l'ensemble, il relève cependant du cadre de l'astronomie médiévale.

Nicolas Copernic (1473-1543) naît à Torun en Pologne et étudie à l'université de Cracovie. Cette université, éloignée des grands centres culturels de l'époque, a néanmoins une importante tradition concernant l'astronomie. En 1496, Copernic se rend en Italie pour y étudier. Il étudie le droit à Bologne, où il est enregistré dans la Nation germanique en tant que « Nicolaus Kopperlingk de Thorn ». Il étudie ensuite la médecine à Padoue, et obtient enfin un doctorat en droit canon à Ferrare en 1503. Il apprend aussi le grec et s'intéresse à l'astronomie. Sa première observation enregistrée date de mars 1497, et son future disciple Rheticus (Georg Joaquin von Lauchen, 1514-1574), nous dit que vers 1500, Copernic fait des conférences d'astronomie devant un public. A cette époque, on s'occupe d'un important problème d'astronomie pratique : le calendrier, remontant à Jules César qui l'introduisit en 46 av. J.-C., n'est plus en phase avec les saisons.

En 1582, année de la promulgation du calendrier grégorien, il y a un écart de dix jours. En ce qui concerne au contraire l'astronomie mathématique, la cause de ce grave problème est la présence de l'équant dans le modèle de Ptolémée décrit dans l'Almageste. Un autre problème sérieux de la théorie de Ptolémée est le modèle du mouvement lunaire. La théorie ptolémaïque lunaire est satisfaisante en ce qui concerne le calcul de position de la Lune, mais implique la conséquence embarrassante que la distance entre la Terre et la Lune varie de 33 à 64 rayons terrestres.[31] Une pareille variation de distance aurait comme conséquence une fluctuation du diamètre apparent de la Lune de presque un facteur 2, ce qui n'est pas confirmé par l'observation. De plus, un ouvrage important de Ptolémée est perdu : les *Hypothèses planétaires*, un traité global des planètes. Dans cet ouvrage, Ptolémée décrit des modèles planétaires correspondants à ceux de l'Almageste, mais différents dans quelques aspects significatifs. Le but des Hypothèses planétaires est plutôt de construire des mécanismes, appelés par la suite *equatoria*, qui permettent une estimation des positions des planètes : il s'agit donc de calculateurs analogiques. [53]

### Équant

L'*équant* (ou *punctum aequans*) est un artifice mathématique introduit par Ptolémée pour sauver la régularité du mouvement des planètes. Ce point est défini de manière telle que la ligne qui le relie au centre de l'épicycle décrit en temps égaux des arcs égaux. Dans le système de Ptolémée le Soleil, en tournant autour de la Terre, maintient sa vitesse angulaire constante par rapport à l'équant. La Terre est située dans un point différent du centre, tandis que le point équant se trouve dans la position symétrique opposée. La planète, vue de la Terre, semble se déplacer avec une vitesse variable, alors qu'observée du point équant elle semble se mouvoir d'un mouvement uniforme. C'est pourquoi la planète est plus lente quand elle est près du point équant et plus rapide quand elle en est éloignée. Ces ralentissements et accélérations violent une règle fondamentale de la philosophie aristotélicienne : l'uniformité des mouvements.

Au XIII<sup>e</sup> siècle l'astronome al-Tusi à Maragha, en Iran septentrional, réussit à remplacer l'équant par un substitut qui n'utilise que des mouvements circulaires uniformes. A chaque planète on ajoute deux petits épicycles, une complication qui semble acceptable. Cet artifice est connu sous le nom de *Couple de Tusi*, terme moderne forgé par l'historien de l'astronomie Edward Kennedy en 1966. Les écrits de al-Tusi sont en général demeurés inconnus en Europe. On n'a retrouvé aucune traduction latine de ces œuvres en arabe, ni leur exposé dans des textes latins. Le concept d'équant est d'une importance particulière, parce que les objections esthétiques formulés par Copernic à son utilisation lui fournissent une des raisons de rejeter le modèle ptolémaïque, et de rechercher un modèle planétaire radicalement différent. Copernic se sert d'épicycles et d'excentriques, tout comme ses prédécesseurs, mais non des équants, et il estime que le fait de ne pas les utiliser est un des avantages de son système. Dans le *De Revolutionibus* Copernic, pour supprimer l'équant, utilise en réalité le même expédient que celui d'Ibn al-Shatir (1304-1375). On discute encore pour savoir si Copernic a connu ces

techniques de substitution du *Punctum aequans*, ou s'il les a développées indépendamment. D'un point de vue moderne on peut affirmer que le point équant de Ptolémée est strictement similaire au « feu vide » d'une orbite elliptique de Kepler, alors que l'autre feu est occupé par le Soleil (Première Loi de Kepler) Une planète observée depuis le « feu vide » paraît en fait se mouvoir autour du Soleil avec une vitesse essentiellement uniforme.

Video download – Excentriques, équants et ellipses : tentatives d'approximation des vraies orbites (avi-DivX, 2,8Mb) ???

Figure 4.6. Modèle à épicycle et déférent avec équant. Observée depuis le centre géométrique de son déférent, il semble que la planète se déplace à vitesse irrégulière ou qu'elle ondoie, alors qu'elle a un mouvement régulier si elle est observée du point équant.

Figure 4.7. Nicolai Copernici Torinensis - *De Revolutionibus Orbium Coelestium. Libri VI* (frontispice de la 2<sup>e</sup> édition, Bâle, 1566). (Wikimedia Commons ; user Joonasl)

Tout ce dont on dispose dans l'Almageste, c'est d'un modèle à épicycle et d'un déférent pour chaque planète, mais l'auteur ne spécifie pas si les modèles mathématiques présentés peuvent être considérés physiquement. Le fait que Ptolémée n'ait pas laissé une description des mouvements planétaires globale et cohérente, heurte particulièrement la sensibilité néoplatonicienne de l'époque, rendant l'Almageste insatisfaisant. A cet aspect esthétique fait contreponds la bonne précision du modèle ptolémaïque dans la prévision des positions des planètes. Depuis des siècles les mathématiciens astronomes, arabes d'abord puis latins, suivant les prescriptions de Ptolémée, calculaient des tables pour les positions des planètes[32]

Il y a donc de bonnes raisons pour essayer de construire un modèle des mouvements planétaires qui sauve les apparences observées, évite l'équant et ait une précision égale à celle de l'ancienne astronomie de Ptolémée. Mais ce n'est pas une simple affaire. Copernic a plusieurs indices qui peuvent lui montrer la route à prendre. L'un est une constatation mystérieuse, déjà notée par les astronomes de différentes époques. C'est le fait que la période de révolution du Soleil, ou l'année, revienne comme une constante dans les périodicités des mouvements des planètes. Evidemment les planètes partagent quelque chose avec le Soleil (par rapport à la Terre), mais quoi, et pourquoi ? Dans un modèle héliocentrique le « mystère » de l'omniprésente période du Soleil disparaît, parce que c'est seulement dans un modèle géocentrique, où les mouvements planétaires sont décrits par rapport à un observateur terrestre, que la période annuelle apparaît. Si on arrête de décrire les mouvements planétaires par rapport à la Terre, et si on affirme que c'est la Terre qui tourne autour du Soleil en une année, alors l'anomalie ne s'observe plus. [22]

En 1503 Copernic retourne en Pologne et devient chanoine de la cathédrale de Frauenburg ; en privé il poursuit ses études d'astronomie. Nous ne connaissons pas bien l'évolution de sa pensée, mais peu après son retour en Pologne, paraît un opuscule manuscrit : le *Commentariolus* (*Hypothesibus motuum coelestium a se constitutis commentariolus*). Copernic ne publie pas le *Commentariolus*, et le remet seulement à quelques amis ; nous ne savons pas qui l'a reçu ni quand. Il semble que la version préliminaire de ce manuscrit ait été composée peu avant 1515. Dans ce « petit commentaire » il expose sa perplexité face aux modèles planétaires existants et porte un intérêt particulier au problème des équants. Il formule aussi des points fixes, les *petitiones*, pour une vision alternative basée sur le mouvement de la Terre autour du Soleil. Ce choix de système héliocentrique permet en outre de fixer l'ordre des planètes sans aucune ambiguïté, alors que les auteurs adeptes du géocentrisme, comme Platon et Cicéron, sont en désaccord sur la place qui revient au Soleil dans la séquence. Le choix d'un modèle héliocentrique permet enfin d'éliminer les équants pour les planètes et la lune.

On ne parle pas beaucoup du chanoine polonais jusqu'en 1539, lorsque Rheticus, qui enseigne les mathématiques à l'Université reformée de Wittenberg, lui rend visite. Le résultat de cette rencontre est que Copernic permet la publication par les soins de Rheticus d'un ouvrage : la *Narratio Prima* (*De libris revolutionum Copernici narratio prima*), imprimé l'année suivante. La publication de cet ouvrage ne déclenche pas des polémiques particulières, et c'est peut-être ce qui convainc Copernic de confier encore à Rheticus sa grande œuvre : *Nicolai Copernici Torinensis - De Revolutionibus Orbium Coelestium, Libri VI*, partout connu sous le nom de « *De Revolutionibus* », publié en 1543, l'année même de la mort de Copernic.[54] Mais Rheticus, qui a des charges d'enseignement, n'a pas pu assurer longtemps le travail préparatoire et surveiller l'impression de l'œuvre. Il s'est appuyé sur un théologien luthérien Andreas Osiander (1498-1552) qui, en toute bonne foi et avec l'intention de protéger l'auteur contre de désagréables controverses, a précédé l'œuvre d'une préface non signée (que beaucoup attribuèrent à Copernic lui-même) . Il y affirme que l'auteur n'entend pas soutenir le mouvement de la Terre autour du Soleil, mais que c'est simplement une hypothèse utile sur laquelle baser les calculs des modèles planétaires.[32] La préface d'Osiander brouille le message de Copernic ; la position de l'astronome polonais aurait été claire pour ceux qui auraient pu étudier son œuvre en entier ; mais ses lecteurs sont tout au plus des mathématiciens astronomes, préoccupés de calculer des tables planétaires, plutôt que des penseurs cherchant à comprendre ce que doit être la « vraie » cosmologie. Nous devons à Owen Gingerich un travail approfondi de recherche, qui a duré 35 ans, sur toutes les copies encore repérables des deux premières éditions du *De Revolutionibus*. Cette recherche sur les commentaires en marge des astronomes propriétaires de ces livres, met en évidence comment ils se sont intéressés aux calculs pratiques, et ont tout à fait ignoré la cosmologie.[46] Erasmus Reinhold (1511-1553) par exemple, recteur de l'Université de Wittenberg, adopte le modèle exposé par Copernic dans le *De Revolutionibus* pour calculer ses *Tabulae prutenicae*, connues aussi comme les Tables prussiennes, en 1551, apportant de petites corrections aux paramètres des modèles de Copernic. Avec ces Tables Reinhold pense remplacer les Tables Alphonsines, vieilles alors de trois siècles. Christophe Clavius utilise les tables prussiennes de Reinhold et le travail de Copernic comme base de la réforme du

calendrier voulue par le Pape Grégoire XIII. Quand la réforme entre en vigueur dans les pays catholiques, le jeudi 4 octobre 1582 du calendrier julien est suivi par le vendredi 15 octobre 1582 du nouveau calendrier grégorien. Dans le Royaume Uni et d'autres pays non catholiques, on ne réforme pas le calendrier avant 1752, et pour aller de pair avec les saisons on doit ajouter 11 jours en passant du 2 au 14 septembre. En Russie enfin, le calendrier grégorien n'est introduit qu'en 1917.

A l'exception du premier livre introductif, le *De Revolutionibus* est trop mathématique pour être lu et compris par des non spécialistes. L'exposition du système copernicien n'occupe que la moitié environ du premier livre du *De Revolutionibus* ; le reste de l'œuvre consiste en calculs qui démontrent comment l'hypothèse héliocentrique peut expliquer et prédire les mouvements planétaires sans l'équant.[22] Finalement l'astronomie planétaire est reconstruite, elle que l'Almageste ne décrit pas comme un ensemble cohérent.

Le *De Revolutionibus*, examiné à la lumière de ses conséquences, apparaît comme une œuvre sévère, équilibrée et conservatrice.[32] Sous tous ses aspects, sauf pour le mouvement de la Terre, il semble que le *De Revolutionibus* soit plus proche des œuvres de Ptolémée et des astronomes médiévaux, que des œuvres des générations qui suivent et qui basent leur travail sur celle de Copernic. Ils portent les conséquences de tout ce que Copernic a affirmé jusqu'à des limites que même Copernic n'a même pas prévues. Parmi les premières conséquences, il y a une dilatation immédiate de la sphère céleste. La terre peut avoir un mouvement orbital autour du centre de la sphère céleste et du Soleil central, pourvu que son orbite ne la porte jamais trop loin du centre. Dans le cas contraire l'observation des étoiles mettrait en évidence ce déplacement. Il s'ensuit donc que la sphère des étoiles fixes doit être beaucoup plus grande que le diamètre de l'orbite terrestre, beaucoup plus ample que supposé précédemment.

Le philosophe et historien des sciences Thomas Khun (1922-1996) a montré trois *incohérences* significatives dans le *De Revolutionibus* : il s'agit de contradictions qui trouvent une justification dans sa nature d'œuvre à cheval sur deux époques.[32]

- **La première incohérence** du *De Revolutionibus* est la *disproportion entre l'objectif qui a été la cause de l'innovation copernicienne et l'innovation elle-même* ; Copernic veut abolir la monstruosité de l'équant, mais il se retrouve en train de faire tourner la terre autour du Soleil, comme si c'était un simple corollaire du problème des planètes ; puis il acquiert la conviction du mouvement de la Terre en examinant les mouvements célestes. Dans l'œuvre de Copernic, la conception révolutionnaire du mouvement de la Terre semble initialement un résultat non prévu et collatéral de la tentative d'un astronome mathématicien de réformer les techniques de calcul des positions des planètes.

- **La seconde incohérence** du texte consiste dans la constatation que *la révolution copernicienne, comme nous la connaissons, peut être difficilement retrouvée* dans le *De Revolutionibus*. Une grande partie des éléments essentiels pour lesquels la révolution copernicienne nous est connue, c'est-à-dire des calculs simples et approfondis de la position des planètes, l'abolition des épicycles et des

excentriques, l'abandon des sphères célestes, le Soleil compris comme une étoile, ne peut se trouver en aucun endroit de l'œuvre de Copernic.

- **La troisième incohérence** du *De Revolutionibus* est que *le système planétaire de Copernic en réalité n'est pas un système exactement centré sur le Soleil*. Faire mouvoir la Terre ne donne même pas à Copernic la possibilité de se passer des épicycles dits mineurs, qui n'impliquent pas la rétrogradation des mouvement planétaires mais servent cependant à corriger quelques imprécisions. Pour expliquer la rapidité accrue avec laquelle le Soleil se déplace durant l'hiver à travers les constellations du zodiaque, Copernic déplace le centre de l'orbite de la Terre en l'éloignant de celui du Soleil. Pour expliquer des prétendues irrégularités du mouvement apparent du Soleil, dues aux discordances entre les observations anciennes et de son époque, il assigne même un mouvement à ce centre déplacé. Il introduit donc une série de petits épicycles et excentriques pour obtenir la précision cherchée. Le centre de l'orbite de Mars, par exemple, est déplacé par rapport au centre de l'orbite de la Terre. Mais les complications ne s'en tiennent pas là. D'autres expédients ont été nécessaires pour justifier les déviations de chaque planète vers le nord ou le sud de l'écliptique. Le système final n'est donc pas un système proprement « héliocentrique »

Figure 4.8 *De Revolutionibus orbium coelestium*, Livre I, Chapitre 10. Le système des sept cercles présenté dans le Livre I du *De Revolutionibus* est devenu le symbole de la nouvelle astronomie héliocentrique. Il s'agit d'une description merveilleusement simple mais illusoire. Le vrai modèle copernicien, développé dans le reste de l'œuvre devint finalement presque aussi compliqué que celui de Ptolémée : de fait tous les deux utilisaient plus de trente cercles. Wikimedia Commons ; user Matthead),

La préface de l'ouvrage s'ouvre avec un acte d'accusation contre l'astronomie de Ptolémée, pour son imprécision, sa complexité et son incohérence. Et pourtant Copernic reprend plusieurs de ces défauts. Le système copernicien n'est ni plus simple ni plus précis que celui de Ptolémée. En outre *Copernic n'est pas à même de déduire de ses hypothèses une combinaison particulière et unique de cercles indépendants*, et ses successeurs ne le font pas non plus. Ces aspects de la tradition ptolémaïque qui ont poussé Copernic à innover de manière radicale n'ont pas été complètement éliminés. Pour expliquer la rétrogradation des planètes Ptolémée utilise 12 cercles : un chacun pour le Soleil et la Lune et deux chacun pour les planètes, c'est-à-dire le déférent et l'épicycle. Copernic au contraire arrive à la même explication *qualitative* avec seulement sept cercles. Il utilise seulement un cercle, centré sur le Soleil, pour chacune des six planètes et un pour la Lune. Si on est intéressé par une explication qualitative des mouvements planétaires, le système de Copernic paraît être le plus simple des deux, et certainement celui qui répond aux questions du Rasoir d'Occam. Mais cette économie du modèle copernicien est en réalité illusoire. Le système des sept cercles présenté dans le Livre I du *De Revolutionibus* ne permet pas de prévoir la position des planètes avec une précision comparable à celle de Ptolémée. Il a la précision d'une version simplifiée à 12 cercles du système ptolémaïque. Pour arriver à une explication

acceptable sur le plan quantitatif de la variation de position des planètes, Ptolémée est contraint d'ajouter à son système de 12 cercles, des épicycles mineurs, excentriques et équants. Copernic est aussi obligé d'user d'épicycles mineurs et excentriques pour obtenir des résultats suffisamment précis dans son système, si bien que son modèle complet est finalement à peine moins compliqué que le système de Ptolémée : en fait tous les deux utilisent plus de trente cercles. Nonobstant cela, le *De Revolutionibus* persuada plusieurs successeurs de Copernic que la clé du problème des planètes était dans un système centré sur le Soleil ; mais pourquoi deviennent-ils copernicien à défaut d'une plus grande économie ou précision ? Quelles raisons peuvent-ils avoir pour mettre la Terre à la place du Soleil ? Des astronomes comme Reinhold trouvent plus sage d'étudier l'œuvre de Copernic plutôt que de se référer à celle de Ptolémée, désormais vieille de 14 siècles. Avec le temps il devient de plus en plus difficile de trouver de bonnes raisons de garder une vision géocentrique plutôt que d'admettre la théorie copernicienne. Nombre d'astronomes tiennent pour possible d'exploiter le système copernicien, contribuant à son affirmation, tout en niant le mouvement de la Terre ou sans se prononcer. Le silence de Reinhold sur la validité physique du système mathématique qu'il a adopté pour compiler les *Tabulae prutenicae* est interprété comme un symptôme de l'opposition officielle à la théorie de Copernic à l'université protestante de Wittenberg. Les astronomes de la Renaissance peuvent prendre la liberté de traiter le cercle qui représente l'orbite de la Terre autour du Soleil comme une fiction mathématique, utile seulement pour les calculs ; ils peuvent calculer *comme si* la terre se mouvait, sans s'engager dans la réalité physique de ce mouvement. Osiander dans sa préface anonyme a, en fait, encouragé les lecteurs à profiter de cette possibilité. [32]

### Réalisme et Empirisme

Dans la philosophie contemporaine le *réalisme* est la croyance en une réalité qui existe indépendamment de nos schémas conceptuels, de nos pratiques linguistiques et de nos pensées. Les philosophes et les scientifiques qui se déclarent réalistes, pensent que la vérité consiste en une certaine forme de correspondance des pensées à la réalité externe. Approximativement, le réalisme scientifique est la thèse que les entités *non observables* traitées par la science sont peu différentes des choses normales observables (comme des tables et des chaises)

L'empirisme (du grec *empiria*, *expérience*) est au contraire le courant philosophique, né au XVII<sup>e</sup> siècle en Angleterre, selon lequel la connaissance humaine dérive exclusivement des sens ou de l'expérience. Au sens large, aujourd'hui par empirisme, on entend une approche expérimentale de la connaissance, basée sur la recherche et le processus inductif à posteriori, préféré à la pure logique déductive. On peut dans ce sens, faire entrer dans le courant empirique Aristote, Thomas d'Aquin, Francis Bacon, Thomas Hobbes. L'empirisme est le précurseur du *positivisme logique*, connu aussi comme *empirisme logique*. Le positivisme logique est un courant qui apparaît dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, basé sur le principe que la philosophie doit aspirer à la rigueur propre à la science. Les débuts du positivisme logique remontent à 1910-1921, quand un groupe d'intellectuels, le *Cercle de Vienne*, se réunit dans un café de la capitale autrichienne, le Café Central, pour discuter de la philosophie de la

science de Ernst Mach. A la base du positivisme, il y a les concepts d'*empirique*, ou relation à l'expérience et *logique*, c'est-à-dire savoir analyser selon les critères rigoureux de la logique. L'affirmation la plus caractéristique du positivisme logique est qu'une proposition a un sens seulement si elle est *vérifiable*. Il s'ensuit que sont dotées de sens les propositions empiriques, comme « tous les corps tombent vers le centre de la Terre », vérifiées par l'expérience. Pour les positivistes le but de la science est l'accord avec les données expérimentales. Si nous arrivons à faire des prédictions que justifient de manière approfondie et élégante le comportement du dispositif de mesure, le jeu est fait. Les dilemmes ontologiques (qu'est-ce qui existe réellement ?) constituent un luxe insignifiant et doivent être mis de côté. L'histoire de ce point de vue est très longue ; Osiander dans la préface du *De Revolutionibus*, invite à considérer le système de Copernic simplement comme un moyen qui convient pour « sauver les apparences », un moyen commode pour calculer dans quel point du ciel doivent se trouver les planètes. C'est pourquoi un astronome n'est pas tenu de croire que la Terre se meut vraiment autour du Soleil ; il lui est possible de penser que pour Copernic cette hypothèse n'ait été qu'un utile instrument de calcul. Pour avoir du succès les théories physiques doivent donc démontrer qu'elles peuvent reproduire les faits expérimentaux. Dans la vision positiviste un scientifique peut travailler sur une théorie sans être obligé de la considérer comme « vraie ». On peut dire que, pour le positiviste, la science est prise au sérieux, mais pas au point d'y croire.

Pour les réalistes, au contraire, le rôle de la science est celui de découvrir l'essence réelle du monde physique. Il s'agit d'un objectif qui ne pourra jamais être atteint : il y aura toujours des domaines physiques nouveaux qui attendent d'être étudiés et dont le comportement peut montrer des caractéristiques absolument inattendues. Donnons un exemple pour illustrer les différences entre réalisme et positivisme logique. Considérons le Soleil. Un corps matériel quelconque, dit *corps d'essai*, placé n'importe où dans le voisinage du Soleil, en subira l'attraction, selon la ligne droite joignant les deux centres respectifs. Déplaçons maintenant le corps d'essai dans d'autres zones proches du Soleil et on continuera d'observer l'attraction solaire. Il existe donc une région de l'espace autour du Soleil où on observe une force de gravitation *quand on place un corps d'essai*. Appelons cette région et sa « perturbation », *champ gravitationnel*. Demandons-nous : le champ gravitationnel généré par le Soleil, existe-t-il indépendamment du corps d'essai, ou seulement en présence de celui-ci ?

Il est clair que, de tout ce que nous avons dit, nous ne pouvons *prouver* le champ gravitationnel que par le moyen du corps d'essai. Mais cette entité, le *champ* que nous avons introduit en généralisant à tous les points de la région autour du Soleil tout ce que nous n'avons vérifié que pour quelques points particuliers, (ceux donc où nous avons effectivement placé le corps d'essai) existe-t-elle vraiment ? Au fond, nous, nous n'observons pas directement le champ mais ses effets, c'est-à-dire l'attraction gravitationnelle. A la question que nous nous sommes posé, les *réalistes* et les *positivistes logiques* auraient répondu différemment. Pour un *réaliste* les tests faits avec le corps d'essai mettent en évidence l'évidence d'un aspect de la réalité, non directement perceptible, que nous appelons champ gravitationnel, dont une des propriétés est l'attraction observée, mais pourrait en avoir d'autres encore inconnues. C'est donc l'objet d'une enquête

Le *positiviste logique* ne s'interroge pas sur l'existence ou non du champ, mais il s'intéresse uniquement à la cohérence avec les données expérimentales. Si le « modèle théorique » qui suppose le concept de champ, décrit correctement tout ce qui est observé, alors on l'adopte, si au contraire il ne décrit pas les faits, on le rejette. Tout autre considération pour un positiviste logique ne serait que « métaphysique » et donc étrangère à la science.

Nous en arrivons à une question très critique et encore d'actualité; c'est celle du degré de vérité à attribuer aux théories scientifiques. Dans quel sens décrivent-elles la réalité ? Quand on élabore un modèle du monde autour de nous qui réussit à faire certaines prévisions, sommes-nous tenus de croire qu'il soit « vrai » et que ce soit vraiment la réalité ? Ou pouvons-nous l'adopter sans être obligé de croire en sa vérité ? Le point de discussion est qu'il n'existe pas une voie univoque qui conduise de la réalité à la représentation du modèle mathématique. En d'autres termes, le phénomène étudié ne détermine pas sa description mathématique. Ce qu'on fait c'est traduire en formules les idées et les connaissances relatives au phénomène, non le phénomène en soi. Ceci de prime abord, parce que la réalité est constituée d'un enchevêtrement tellement complexe et inextricable de phénomènes qu'il empêche une description simple et schématique. Il faut donc discerner dans cette complexité ce qu'on veut identifier comme objet de notre enquête. Nous devons opérer des choix, sélectionner des aspects et les isoler de tous les autres, en effectuant cette opération de manière correcte. Nous ne devons pas considérer comme secondaires ces aspects qui sont au contraire essentiels pour l'objet que nous nous proposons d'étudier et vice-versa. Le modèle est donc une construction mathématique qui décrit les phénomènes observés. Il est une représentation formelle des idées et des connaissances d'un phénomène mais ne prétend pas en épuiser le sens ni même l'interpréter. Il se propose seulement de fournir une image de quelques uns de ses aspects, précisément ceux que nous avons choisis de sélectionner. C'est pourquoi, les modèles, si vous préférez les « théories », justement à cause de leurs limites intrinsèques, ne sont pas évalués sur le plan de leur *vérité* comme sur celui de leur *efficacité*, mais ceci est à la rigueur une interprétation à laquelle souscrirait un *empiriste*, aujourd'hui on dirait un *positiviste logique*. Au contraire, un scientifique qui se place sur les positions propres du réalisme pourrait ne pas être d'accord avec une conception aussi minimale. Les questions soulevées par Osiander dans sa préface sont donc loin d'être banales, tenant compte surtout du fait que les prévisions et donc l'efficacité du modèle copernicien, n'étaient pas plus précises que celles de Ptolémée.

Avec la publication du *De Revolutionibus* se termine une première phase du processus de récupération des connaissances astronomiques hellénistiques. Il est significatif que pour effectuer cette opération Copernic ait été obligé de revenir à l'héliocentrisme d'Aristarque. Ceci parce qu'il n'est pas possible de donner une description des mouvements des planètes parfaitement cohérente, dans toutes ses parties, en présupposant que la Terre soit fixe. Ce n'était pas possible au III<sup>e</sup> siècle av. J.-C., ce n'était pas possible au temps de Copernic. En d'autres termes, pour offrir une description cohérente des énigmatiques mouvements planétaires, l'héliocentrisme est le choix obligé.