

UNE HISTOIRE DE L'ASTRONOMIE



la Préhistoire - l'Antiquité - le Moyen-Âge
la Renaissance - l'Âge de Raison
le siècle des Lumières - le XIX^e siècle
les XX^e et XXI^e siècles - iconographie



Une histoire de l'astronomie

Préambule

Établir et rassembler un document intitulé « une histoire de l'astronomie » peut paraître très ambitieux et procède de nombreux choix qui, en tant que tels, sont nécessairement subjectifs.

Nous sommes confrontés au premier choix qui consiste à prendre la voie de l'encyclopédie, pour tout dire, tout explorer et être totalement exhaustifs. La conséquence en serait la production d'un volume incalculable de données, d'évènements, de noms, de photos, etc. Faire le choix de cette approche serait très long et difficile, sauf au prix de produire des milliers de pages qui, ipso facto, seraient probablement illisibles et dans lesquelles le lecteur pourrait facilement se perdre, voire se lasser ou s'ennuyer.

L'autre approche, celle que nous avons choisie, est celle de l'arbitraire, en faisant certains choix à priori : parler de telle ou telle découverte plutôt que d'autres, parler sommairement de la famille et/ou de la personnalité de certains astronomes, parler de certaines civilisations pour voir ce qu'elles ont apporté à la science du ciel et des étoiles et à notre compréhension progressive de l'Univers dans lequel nous nous trouvons. Comme les choix que nous avons faits sont arbitraires, ils sont nécessairement discutables puisque biaisés, en ne retenant que ce qui nous paraît le plus important et en laissant donc de côté ce qui nous semble secondaire (ou moins indispensable).

Par ailleurs, nous avons été frappés par le fait que cette histoire présente clairement trois types de structure suivant les âges :

- 1) De la préhistoire jusqu'au Moyen-Âge ou à l'aube de la Renaissance, l'astronomie est générée et portée par des peuples, des civilisations, des croyances religieuses, des rites. Bien sûr, dans ces contextes culturels, il y a des hommes qui se sont mis en avant par leurs qualités intellectuelles et « novatrices », mais ils s'inscrivent clairement dans leur environnement socioculturel, spirituel et géographique.
- 2) Du milieu de la Renaissance jusqu'à la seconde guerre mondiale, on change complètement de structure. On assiste à la mise en avant d'individus isolés dont le génie, la créativité et l'inventivité prennent ostensiblement le pas sur leur environnement sociétal. Ces hommes se sont même souvent mis en opposition, en conflit (voire même parfois en danger) avec les idées établies ou les dogmes de leurs époques respectives. Ce furent, individuellement, des pionniers, des aventuriers de l'astronomie.
- 3) Puis, dans la deuxième moitié du XX^e siècle, on revient à une astronomie de groupe. Mais pas pour les mêmes raisons que celles qui ont prévalu à la première époque. A partir des années 1950/1960, la technologie et la science en général ont fait des progrès considérables et foudroyants. On sent alors une fantastique accélération technologique. On commence à lancer des satellites dans l'espace. On envoie des hommes sur la Lune. On lance des sondes vers les planètes du système solaire. On pose des robots sur la Lune, Mars et Vénus. On met des télescopes en orbite pour s'affranchir des inconvénients de l'atmosphère terrestre, des télescopes qui « voient » non seulement dans le spectre visible mais également dans l'infrarouge, l'ultraviolet, les rayons X, les rayons gamma ou les ondes radio.

Le problème est que tout cela coûte très cher et n'est plus finançable par les individus. Il y a clairement une internationalisation de l'astronomie. Il est donc nécessaire de s'appuyer sur des organisations scientifiques et/ou des états, ou encore des regroupements d'états pour construire des gigantesques télescopes (Chili, Hawaï, etc.), envoyer une sonde poser un atterrisseur sur une comète ou envisager d'envoyer des hommes sur Mars. Les individus qui étaient jadis financés par des mécènes ou souverains du XV^e au XVIII^e siècle ne sont plus là. Les Etats prennent le relais, au travers d'organisations structurées qui recrutent et forment des individus (astrophysiciens, informaticiens, mathématiciens, etc.) qui travaillent obligatoirement dans des équipes. Exception : Stephen Hawking !

Bonne lecture !



Nabta Playa

Vieille de plusieurs milliers d'années d'histoire, l'**astronomie** est probablement une des plus anciennes des sciences naturelles, ses origines remontant au-delà de l'Antiquité, dans les pratiques religieuses préhistoriques. L'astronomie est la science de l'observation des astres et cherche à expliquer leur origine, leurs éventuelles évolutions et aussi l'influence qu'ils ont sur la vie de tous les jours : marées, crue du Nil, canicule, etc. Cette influence se manifeste par certains phénomènes exceptionnels (les éclipses, les comètes, les étoiles filantes, etc.) qui pour certains étaient des événements majeurs dans le rythme de vie de la communauté comme les saisons et pour d'autres la possibilité de mieux faire avancer les connaissances au niveau de la compréhension de l'univers céleste. Elle ne doit pas cependant être confondue avec des disciplines très proches telles que l'archéoastronomie, la mécanique céleste qui n'en sont que des domaines particuliers. L'étymologie du terme *astronomie* vient du grec *αστρονομία* (*άστρον* et *νόμος*) ce qui signifie *loi des astres*. L'astronomie est peut-être la plus ancienne des sciences, comme semblent l'indiquer nombre de découvertes archéologiques datant de l'âge du bronze et du Néolithique. Certaines civilisations de ces périodes avaient déjà compris le caractère périodique des équinoxes et sans doute leur relation avec le cycle des saisons, elles savaient également reconnaître quelques dizaines de constellations. L'astronomie moderne doit son développement à celui des mathématiques depuis l'Antiquité grecque et à l'invention d'instruments d'observation à la fin du Moyen Âge. Si l'astronomie s'est pratiquée pendant plusieurs siècles parallèlement à l'astrologie, le siècle des Lumières et la redécouverte de la pensée grecque ont vu naître la distinction entre la raison et la foi, si bien que l'astrologie n'est plus pratiquée par les astronomes de nos jours.



STONEHENGE

Certains ont même pu imaginer que des dessins et peintures rupestres pouvaient faire penser à la représentation de certaines constellations dans les Grottes de Lascaux (Dordogne) ou Blanchard (Indre), mais ces hypothèses sont invérifiables. Il semble que les premières traces évidentes d'une relation entre l'astronomie et des constructions humaines ne commencent qu'à partir du néolithique.

I La préhistoire

L'observation du ciel à la Préhistoire

Par définition, il n'existe pas d'information directe ou écrite concernant les observations du ciel au Paléolithique. Seuls de rares indices isolés permettent de les soupçonner. Selon de rares auteurs tels qu'Alexander Marshack ou Chantal Jègues-Wolkiewiez, paléo-astronome, certains objets témoigneraient de l'observation des astres, du Soleil ou de la Lune en dressant une cartographie des positions des objets célestes. Selon A. Marshack, les indentations gravées sur un os d'aigle mis au jour dans l'abri Blanchard et datant d'environ 32 000 ans correspondraient à des notations lunaires : leur nombre et leur position pourraient être mis en rapport avec les lunaisons. Selon C. Jègues-Wolkiewiez, l'ornementation spécifique des grottes du sud de la France, lorsque celle-ci correspond par exemple à des solstices, serait un autre élément significatif. Cet auteur considère même que les peintures de ces grottes pourraient être des cartographies stellaires. Pour elle, la scène du Puits de la grotte de Lascaux (environ 17 000 ans), supposerait des connaissances astronomiques : elle croit y reconnaître une représentation des Pléiades et du zodiaque. « La visualisation de la lumière solaire sur la porte d'entrée de la grotte pendant 50 minutes environ lors du coucher solaire au moment du solstice d'été, confirme cet éclairage complet de la rotonde pendant cette période solsticiale au temps de la création de l'œuvre. Éclairage permettant même un travail en pleine lumière, presque durant une heure pendant quelques jours par an au début de l'été. Mais aussi lumière de la pleine lune le matin lors du solstice d'hiver ». La signification profonde de ces cartographies est inconnue; elle pourrait être d'ordre religieux ou calendaire, marquant les grandes périodes de migration, de chasse, etc. Toutefois, cette interprétation n'a été publiée dans aucune revue à comité de lecture et est accueillie avec scepticisme par la communauté scientifique. Quoi qu'il en soit, le manque d'indices archéologiques explicites ne signifie aucunement que l'observation du ciel ne jouait aucun rôle chez les hommes préhistoriques : celle-ci est bien attestée dans les cultures des chasseurs-cueilleurs contemporaines, comme les aborigènes d'Australie.

Au Néolithique, les sources se multiplient même si leur interprétation demeure délicate. La mise en œuvre de calendriers, qui témoignent de connaissances certaines de l'évolution du ciel, revêtait pour ces civilisations agraires une importance vitale. La possibilité d'anticiper les événements saisonniers ou annuels rendait la planification possible. On attachait ainsi aux causes possibles des phénomènes célestes une interprétation religieuse. L'émergence des pratiques agraires s'est peut-être accompagnée de la pratique de divers cultes ouraniens (qui se rapportent au ciel, espace dédié au sacré) et, avec cela, de l'astronomie et de l'astrologie (aussi bien d'ailleurs, de l'astrologie chaldéenne que chinoise). D'innombrables sépultures de cette époque sont orientées dans une direction du ciel particulière. Parmi les découvertes archéologiques associées à une pratique du calendrier, il y a lieu de citer les cônes d'or rituels mis au jour en France et en Allemagne méridionale, interprétés comme les couvre-chefs de prêtres d'un culte solaire, et le disque de Nebra. Le cercle de Goseck, tracé il y a près de 7000 ans, est le plus ancien observatoire solaire connu.

Les vestiges qui nous sont parvenus du Néolithique, tels les grands cercles mégalithiques dont les plus connus sont Nabta Playa, vieux de 6000 à 6500 ans, ou Stonehenge (Wiltshire, Angleterre), mis en place entre 5000 et 3500 avant le présent, peuvent difficilement être qualifiés d'observatoires. En effet, leur fonction était avant tout religieuse, et l'observation, si observation il y avait, était limitée au repérage rituel d'alignements solaires, peut-être lunaires, au moment du lever et du coucher de ces astres à certaines époques de l'année. De plus les groupes culturels qui les ont érigés ne répondent pas aux conditions exprimées ci-dessus : ils se caractérisent en particulier par l'absence d'une écriture et de documents qui nous permettraient de déduire avec certitude que la fonction des monuments mégalithiques comportait bien une composante astronomique, ou même que l'astronomie jouait un rôle majeur au sein de ces groupes. Camille Flammarion par exemple, et bien d'autres avant et après lui, parlera au sujet des cercles mégalithiques de « monuments à vocation astronomique » et d'« observatoires de pierre ». Mais les études menées ces trente dernières années ont fortement nuancé une telle affirmation. Depuis les années 1970, la discipline autonome de **l'archéoastronomie** se consacre à l'étude de ce genre d'édifices et à leur signification astronomique.

Selon la NASA, les cinq observatoires les plus anciens sont :

- **Le cercle de Goseck, Allemagne.**
- **Nabta Playa, Haute Égypte;**
- **Stonehenge, Comté de Wiltshire, Angleterre;**
- **Kokino, Macédoine;**
- **Angkor Wat, Cambodge.**

A) Le cercle de Goseck

Il se trouve dans le land de Saxe-Anhalt en Allemagne. Découvert par archéologie aérienne en août 2003, c'est un énorme cercle tumulaire de 75 m de diamètre, reposant dans une plaine emblavée (ayant été semée de céréales). Il comprend une série de trois cercles concentriques de terre et d'épieux de bois (sans doute à l'époque renforcés d'épineux) avec chacun 3 ouvertures qui coïncident avec les levers et couchers du soleil aux solstices d'hiver et d'été. L'existence d'un quatrième cercle extérieur, qui aurait disparu au fil des âges, est fortement discutée.

Les travaux du Dr Schlosser de l'Université de la Ruhr à Bochum, astronome spécialisé en astro-archéologie, est depuis à l'œuvre pour reconstituer un temple du Soleil érigé par une civilisation européenne chevauchant les âge de la pierre et âge du bronze final. Daté de 4800 avant l'ère chrétienne, il serait donc légèrement antérieur aux sites similaires retrouvés en Mésopotamie ou en Haute-Égypte (Nabta Playa). Wolfhard Schlosser pense que le remarquable agencement du site indique que l'on se trouve, en fait, devant l'un des premiers exemples d'observatoire astronomique; astronomique certes mais surtout utilisé à des fins astrologiques et agricoles. Pour Schlosser, l'un des trois portails, le sud, marquait le lever et le coucher héliaque aux solstices d'hiver et d'été. Il permettait aux prêtres mais aussi aux premiers agriculteurs européens de déterminer avec précision le calendrier de leurs travaux mais également de se protéger des diverses agressions inhérentes à cette époque (bêtes sauvages, tribus hostiles, ...).

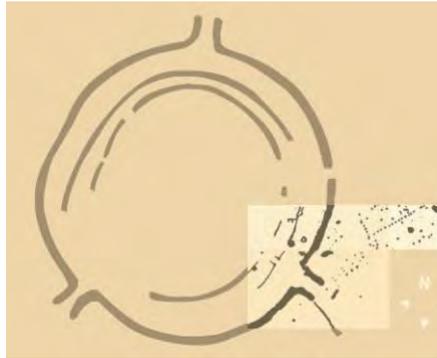
Toujours selon Schlosser, « Goseck n'est pas simplement une « construction calendaire », mais, plutôt, et clairement une construction sacrée ». Dans sa démonstration, Schlosser établit avec adresse que le site a été construit pour l'observation des phénomènes astronomiques tels que les mouvements des astres les plus proches (lune et soleil, étoiles et planètes), mais aussi pour suivre le déroulement du temps. Ces cycles célestes furent importants pour l'accomplissement des rites mais aussi pour les semailles et les moissons de cette toute première organisation humaine digne d'être nommée civilisation. Corroborant ceci, le Pr Francois Bertemes de l'Université de Halle-Wittenberg indique qu'il est assez habituel que de tels observatoires astronomiques aient été également des lieux de culte et les centres de la vie sociale.

En fait, toutes les activités sacrées, profanes, *scientifiques* étaient si fortement imbriquées que séparer les unes des autres relève quasiment de l'artifice. On peut cependant mettre en exergue :

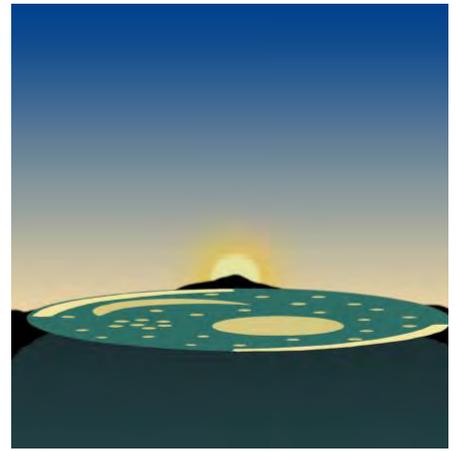
- Les activités agricoles : les fouilles des maisons voisines en bois-argile ont fourni une variété de grains et la preuve d'une toute première domestication des chèvres, moutons, porcs et vaches. Les fermiers ont atteint cette partie du monde environ 500 ans avant qu'ils n'aient construit l'observatoire solaire. Les tout premiers agriculteurs néolithiques auraient évalué quantitativement le cycle lunaire (Déesse-Lune) et les positions des constellations. Les Pléiades, qui disparaissent du ciel du nord au printemps et qui réapparaissent à l'automne, marquent toujours les cycles de récolte pour beaucoup de fermiers dans l'hémisphère Nord. Mais du fait que leurs repères de plantation se décalaient dans le temps du fait de la non concordance du cycle lunaire et du cycle solaire (saisons), ils en vinrent à force d'observations à comprendre que le solstice d'hiver permettait le recalage calendaire sur le cycle solaire au moment précis du « nouveau soleil », *Neu Sonne* en allemand (fils du Dieu-Soleil).
- Les activités artisanales : des restes de pierres taillées, céramiques, fonderie, tissage, etc. sont largement présents sur le site.



Goseck : L'un des cercles de rondins entre les palissades interne et médiane



Goseck : Schéma pris en 2003 et représentant l'enclos



Le disque de Nebra : Au solstice d'été à Nebra, le soleil se couche derrière le Brocken. Ce fait, non négligeable, permet d'imaginer une orientation possible du disque lors de son utilisation.

Les autres sites monumentaux

Goseck, fait partie d'un ensemble de plus de 200 sites monumentaux, observés d'avion et répartis en Allemagne, Autriche, Slovénie et République tchèque. Mais ces différents sites européens de tertres préhistoriques comprennent habituellement quatre cercles concentriques de terre et de bois, leurs ouvertures étant vraisemblablement reliées aux lever et coucher du soleil au solstice d'hiver. Alors que Goseck, lui, ne comporte (actuellement) que 3 cercles-portails concentriques. Cette particularité relève-t-elle de l'astronomie ou du Sacré (signant par exemple la foi en une Trinité) ?

Sur le même parallèle : les sites de Stonehenge, (comté du Wiltshire, Angleterre), les Externsteine près de Paderborn en Saxe et Goseck se trouvent tous sur le 51^e parallèle. Cependant, le Cercle de Goseck est antérieur de 3000 ans à la dernière phase de construction de Stonehenge.

Le disque de Nebra, proche de Goseck

Au solstice d'été à Nebra, le soleil se couche derrière le Brocken. Ce fait, non négligeable, permet d'imaginer une orientation possible du disque lors de son utilisation. Les experts rapprochent les tertres de Goseck d'une autre découverte spectaculaire faite à moins de 30 km : le disque de Nebra. En effet, bien que ce disque ait été créé 2400 ans plus tard, la conformation du site de Goseck, son orientation et le marquage des solstices d'hiver et d'été offre des similarités avec le disque de Nebra. Bien qu'aucun disque semblable n'ait été retrouvé à Goseck, Bertemes et Schlosser sont persuadés de l'existence d'un tel disque sur le site de Goseck. Comme beaucoup d'autres objets anciens, il aurait pu être refondu ou tout simplement pillé.

De plus, pour Bertemes le troisième arc du disque en confirme l'usage mythologique. Les anciens ne semblaient pas avoir compris de quelle manière le soleil, alors qu'il se couchait à l'ouest, pouvait se lever à l'est le matin suivant. Les représentations, multi-séculaires d'un disque solaire dans une barque, à l'âge du Bronze se retrouvent aussi bien en Égypte qu'en Scandinavie. Elles traduisent la conviction de ces peuples en l'existence d'un vaisseau transportant l'astre solaire, en fait un Dieu, à travers le ciel nocturne. Le disque de Nebra est la première preuve d'un tel dogme en Europe centrale.

Le disque de bronze de Nebra (supra), vieux de 3600 ans, fut découvert à seulement 25 km de Goseck dans la région boisée de Nebra et est considéré comme la plus ancienne représentation concrète du cosmos. Le disque de 32 centimètres est décoré de symboles en feuilles d'or qui représentent clairement le soleil, la lune et leurs mouvements. Un groupe de sept points a été interprété comme la constellation des Pléiades telle qu'elle apparaissait il y a 3600 ans. Schlosser pense que les formations sur le disque étaient basées sur les observations astrologiques précédentes, qui auraient pu être faites à Goseck (l'observatoire le plus proche de Nebra). Les archéologues sont certains que l'observatoire, avec sa fonction de poursuite du

temps, jouait un rôle crucial dans une société dominée par le changement des saisons. Bertemes et Schlosser en concluent que l'observatoire de Goseck et le disque de Nebra signent une connaissance astronomique commune; connaissance liée à une mythologie et une cosmologie bien précises et cela dès les premiers siècles de la civilisation européenne.

B) Nabta Playa

Nabta Playa est un site désertique situé en Égypte, à l'ouest d'Abou Simbel, qui fut occupé à partir du IX^e millénaire avant notre ère par une population préhistorique venant probablement de la vallée du Nil toute proche. L'étude de leur histoire, encore mal connue, génère actuellement beaucoup de retombées historiques et scientifiques. Ce site préhistorique est situé au sud de l'Égypte (en Haute-Égypte, à 100 km à l'ouest d'Abou Simbel), avec pour position approximative : latitude 22° 32' 00" Nord; longitude 30° 42' 00" Est. Ce site qui occupe une dépression située en plein désert de Nubie (partie orientale du Sahara) semble avoir été actif du IX^e au I^{er} millénaire avant notre ère. Ce site se trouvait sur l'ancienne piste caravanière qui reliait Abou Simbel à Bir Kiseiba et au-delà. Ce site, bien conservé par les conditions désertiques du climat, offre un grand intérêt pour plusieurs disciplines : anthropologie, archéologie, préhistoire, égyptologie, agriculture, etc. Sur ce site a été découvert, outre des silex et poteries, un important champ mégalithique vieux de 6000 à 6500 ans, soit 1000 ans de plus que Stonehenge (Wiltshire, Angleterre), lequel est contemporain avec le cercle de Goseck en Allemagne. Il s'agit d'un ensemble de monuments à vocation astronomique. Le climat passé de cette région nous donne la clef de l'implantation de cette curieuse population préhistorique. Alors qu'aujourd'hui, le désert occidental égyptien est tout à fait aride, ce n'était pas le cas dans le passé. Certains éléments nous donnent à penser qu'il y eut plusieurs épisodes humides dans le passé (jusqu'à 500 mm de pluie annuelle), la période la plus récente se situant au cours de la dernière période interglaciaire et glaciaire (glaciation), soit entre 130 000 et 70 000 ans avant notre ère. À ce moment, on rencontrait dans cette région une savane qui abritait une faune très nombreuse telle que des bisons et de grandes girafes, ou encore certaines variétés d'antilopes et de gazelles. Cette période fut suivie d'une autre hyperaride jusqu'au X^e millénaire environ, lorsque les pluies d'Afrique tropicale commencèrent à remonter vers le nord. Une estimation de 50-100 mm de pluie annuelle a été avancée. On vit alors réapparaître une steppe semi-aride, composée d'herbe sahélienne, d'arbres et de buissons. L'eau s'accumula dans certaines dépressions, formant des lacs temporaires, principalement au pied des montagnes. Nabta Playa fut une de ces régions qui vit une population progressivement s'établir entre -10000 et -7000 ans. Fred Wendorf et Romuald Schild ont déterminé que ces êtres humains furent présents pendant plus de 5000 ans, jusqu'à - 2500 ans environ. Toutefois, la majorité de l'implantation s'est faite entre -4500 et -2500.

Origine des populations

Ces nomades, suivant les zones pluvieuses, ont emmené leurs troupeaux paître sur ces herbes nouvelles. D'où venaient-elles ? Les chercheurs pensent qu'elles avaient pour origine la vallée du Nil, près d'Abou Simbel, ou de Ouadi Halfa, ou encore la moyenne vallée du Nil, au nord du Soudan. Ils établirent des camps qui ne furent habités qu'une partie de l'année. Aux environs de -6000, un changement intervint lorsque ces peuplades se mirent à creuser des puits ce qui permit aux populations d'y séjourner toute l'année et notamment pendant la saison sèche (hiver). Les établissements s'agrandirent également, certains des plus grands comptant jusqu'à dix-huit ou vingt tentes rondes ou ovales. Après une autre période très sèche (-4700 à -4500 ans), le retour de la pluie ramena de nouvelles populations qualifiées de néolithiques anciennes. Des évidences très fortes semblent indiquer que ces nouvelles populations avaient un système social qui impliquait un niveau d'organisation pas encore rencontré jusqu'alors en Égypte. Ce monument cérémoniel, même s'il n'est pas très grand (environ 4 mètres de diamètre), est vraiment très impressionnant. Il consiste en une série de tronçons de pierres en grès arrangées en un cercle. Sur le cercle, on voit un groupe de quatre couples de pierres plus grandes, formant des « portes ». À l'intérieur du cercle, on a trouvé trois autres couples de pierres disposées en ligne. Ces rangées, aussi bien sur que dans le cercle, dessinent deux lignes de vues, orientées l'une nord-sud et l'autre 70° nord-est. Cette ligne vise la position calculée du lever du soleil au solstice d'été, au moment où le calendrier a été construit; cette position correspond au début de la saison des pluies dans le désert. L'âge exact du cercle n'est pas connu; toutefois une mesure au carbone 14 indique une date aux alentours de - 4900. À noter certaines analogies avec Stonehenge en Grande-Bretagne, bien que le calendrier de Nabta Playa soit de 1000 ans plus ancien.



Le cercle-calendrier mégalithique à Nabta au moment de son relevé en 1992



Quelques mégalithes de Nabta Playa remontés au musée d'Assouan

Un centre cérémoniel

En plus de plusieurs lieux d'habitations retrouvés à Nabta Playa, on trouve un certain nombre d'artefacts d'architecture inhabituelle. Vu le grand nombre de mégalithes présents en cet endroit, on pense que ce lieu pourrait être un centre cérémoniel régional. Trois structures, en dehors du calendrier déjà analysé, se dégagent :

- une première, constituée de huit tumuli couverts de pierres et contenant des restes de bœufs, chèvres, gazelles et humains; un de ces tumuli contenait même un veau entier, enterré dans une chambre souterraine. Ces restes dateraient du néolithique tardif (-4500 à -3500 ans).
- une deuxième, comprenant un ensemble d'une douzaine de structures complexes constituées de stèles ou menhirs, accompagnés chaque fois de grandes pierres taillées ou non enterrées sous les stèles, à plusieurs mètres de profondeur. Ces structures sont regroupées en quatre grands champs de stèles, et remonteraient au néolithique final (de -3500 à -2500 ans). La construction de ces structures très importantes (plusieurs tonnes) a certainement nécessité un effort très important, qui ne s'explique que s'il existait une autorité religieuse ou politique disposant de ressources humaines en grand nombre.
- un troisième, qui comprend un ensemble de mégalithes alignés, identifié dès les premières années de recherche (1974-77) par le groupe dirigé par Wendorf et identifié sous le nom d'« Expédition Combinée Préhistorique ». Ce groupe a effectué des recherches complémentaires entre 1990 et 2000 dont les résultats ont été publiés en deux volumes en 2001 et 2002. Le groupe décrit trois lignes de mégalithes dressés qui s'étirent dans la partie nord de Nabta Playa. Aujourd'hui, on n'observe plus que des amas de pierres cassées. La plupart de ces pierres ont été taillées en formes plus ou moins rectangulaires ou ovales (voir photo). Toutes ces pierres étaient orientées faces au nord. Le paléoastronome J. M. Malville a déterminé que cette ligne de mégalithes de 600 mètres de long, divisée en fait en trois sous-lignes, était dirigée vers le point du ciel où l'étoile la plus brillante de la Grande Ourse (ou Arcturus) se levait entre -4700 et -4000.

Plusieurs autres lignes de ces mégalithes ont été repérées au sud de la ligne principale. L'une est un double alignement de pierres de 250 mètres de long pointant vers les étoiles les plus brillantes de la ceinture d'Orion. La deuxième ligne sud pointe vers l'endroit du lever héliaque de Sirius, dans la constellation du Grand Chien.

Comme la population de Nabta Playa devait retourner vers la vallée du Nil, lors de la saison sèche, et vu le caractère hautement social de ce groupe, on peut se poser la question s'il n'est pas à l'origine de la civilisation pré-dynastique et des premières dynasties de pharaons. La question reste ouverte.

La proto-agriculture

C'est également sur ce site que les chercheurs américains de l'équipe de Fred Wendorf ont pu mettre en évidence un stockage intensif de sorgho sauvage (sorghum bicolor). Ce qui pourrait traduire une forme possible de proto-agriculture.

Fred Wendorf note, à cette époque, une forte poussée démographique dans la moyenne vallée du Nil. Il relève que « le processus de domestication des bovins au Sahara oriental sur les sites de Nabta Playa et de Bir Kiseiba peut être daté de -10.000 à -9.000. Il serait donc légèrement plus ancien que celui retrouvé en Eurasie ». En fait, le processus de domestication attesté dans la vallée du Nil, 1000 ans plus tôt, aurait lentement gagné la Basse Nubie, au cours du IX^e millénaire. Rapide pour quelques espèces, le sorgho et les bovins sauvages par exemple, la domestication de dizaines d'autres plantes et animaux connus des pharaons (dont le mouton), se serait accomplie de façon beaucoup plus lente et progressive.

La céramique Les similitudes entre les poteries nubiennes de Nabta Playa et celles de Khartoum (poterie rouge à bord noir décorée en ondulés) traduisent l'arrivée au Sahara, d'hommes vivant de l'exploitation des cours d'eau et provenant du moyen Nil. En plein désert, la pêche n'est évidemment pas possible; la perte de cette ressource traditionnelle qu'elle constitue (et accessoirement la chasse au gibier d'eau) a dû favoriser, sinon susciter l'appropriation d'espèces alimentaires les plus facilement accessibles.



Le calendrier de Nabta Playa remonté dans les jardins du musée de la Nubie à Assouan



Stonehenge

C) Stonehenge

Stonehenge est un monument mégalithique composé d'un ensemble de structures circulaires concentriques, érigé entre -2800 et -1100, du Néolithique à l'âge du bronze. Il est situé à treize kilomètres au nord de Salisbury, et à quatre kilomètres à l'ouest d'Amesbury (comté du Wiltshire, Angleterre). L'ensemble du site de Stonehenge et le cromlech d'Avebury, à une quarantaine de kilomètres au nord, sont inscrits sur la liste du patrimoine mondial de l'Unesco dans un ensemble intitulé « Stonehenge, Avebury et sites associés ».

Le nom de Stonehenge est attesté dès le Moyen Âge : le Glossaire latin-vieil anglais d'Ælfric d'Eynsham, du Xe siècle, donne l'expression henge-cliff dans le sens de « précipice », et des auteurs du XI^e siècle mentionnent « des pierres qui se trouvent non loin de Salisbury », sous les appellations de stanenges ou stanheng, comprises comme des « pierres suspendues » (supported stones). En 1740, William Stukeley note que « dans le Yorkshire, les rochers suspendus sont appelés henges... Je ne doute pas, dit-il, qu'en saxon, Stonehenge signifie les « pierres suspendues » (hanging stones) ».

Christopher Chippindale, dans son *Stonehenge Complete*, donne Stonehenge comme pouvant être issu des mots du vieil anglais stān « pierre », et hencg « charnière » (hinge en anglais moderne), ou bien encore de hen(c)en, au sens de « potence » ou « instrument de torture » : les linteaux et les piliers des trilithes de Stonehenge ont pu en effet évoquer pour les visiteurs du Moyen Âge la silhouette familière d'un gibet. Cependant, ailleurs dans son livre, Chippindale donne aussi pour Stonehenge le sens plus immédiat de « pierres suspendues » (suspended stones).

Les préhistoriens ont créé le mot henge par dérivation régressive (ou troncation) d'après le nom de Stonehenge. Ils définissent un henge comme un terrassement en enclos circulaire comprenant un fossé interne. Il faut pourtant considérer que le monument de Stonehenge ne répond pas pleinement à cette définition, puisque le talus (bank) se trouve, sur ce site, à l'intérieur du fossé (ditch) : Stonehenge est donc un henge très particulier, même totalement atypique, avec ses trilithes hauts de plus de 7 m, assemblés par tenons et mortaises, de manière unique. La signification et l'étymologie de Stonehenge restent quelque peu incertaines : « les pierres suspendues » ou « les pierres en surplomb » conviennent aux linguistes familiers des racines germaniques, tandis que « le gibet » semble plutôt relever de l'étymologie populaire.

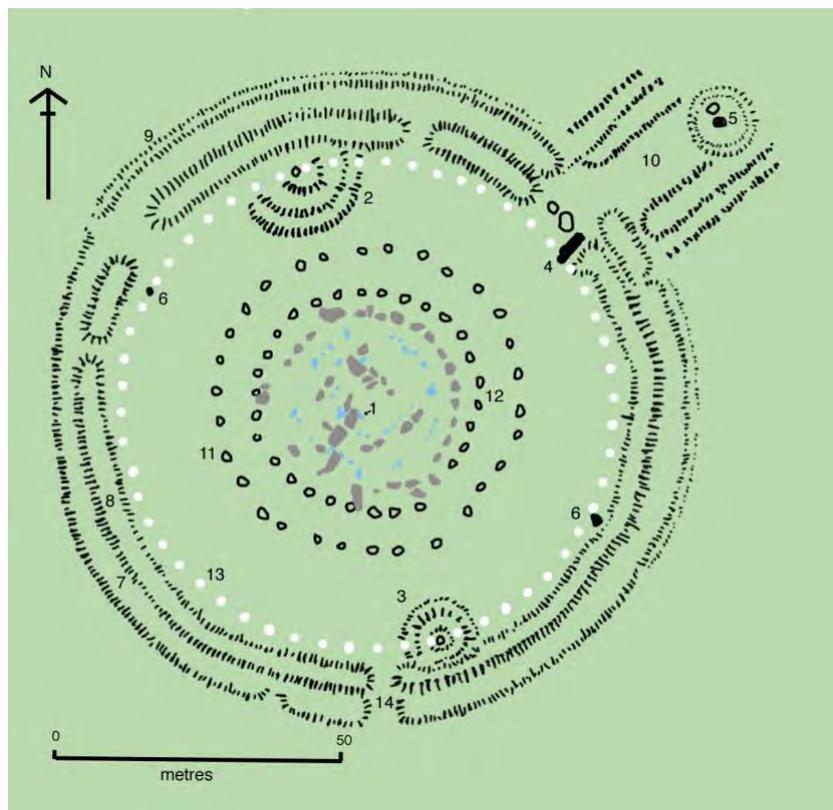
Histoire et description

Chronologie, datation

La datation et la compréhension des différentes phases de l'activité de Stonehenge ne sont pas une tâche aisée. La chronologie retenue dans cet article est celle, classique, de l'archéologue Richard J. C. Atkinson, qui a dirigé les dernières fouilles de grande ampleur, à partir de 1950 et durant une trentaine d'années, avec une importante campagne de restaurations, entre 1958 et 1964. On lui doit la division en trois phases I, II et III, aujourd'hui acceptées de tous. Mais les subdivisions, et même parfois la chronologie tout entière, diffèrent notablement d'un auteur moderne à l'autre.

Avant le monument (vers -8000)

Le site présente les traces d'une occupation antérieure à la construction du monument. Trois trous de poteaux (*postholes*) mésolithiques ont été mis au jour en 1966 lors des travaux d'extension du parking des visiteurs. Ces trous de 75 cm de diamètre contenaient comme artefact un morceau d'os brûlé et des quantités de charbon de bois, ce qui peut suggérer, d'après le diamètre de ces fosses, que les trous étaient destinés à accueillir des arbres d'une hauteur de 9 m. Ils sont actuellement matérialisés par des plots blancs sur le parking. Un long enclos mégalithique, le *Cursus*, construit vers -3 500, s'étend d'est en ouest sur une longueur de 3 km, à 700 m au nord du monument.



Plan du site de Stonehenge. 1. la pierre d'autel; 2 et 3. tumuli; 4. la pierre de sacrifice; 5. la « Heel Stone » (pierre talon); 6. deux des quatre « stations »; 7, 8, 9. fossés, talus; 10. l'« avenue » monumentale, qui mène à la rivière Avon, à trois km à l'est; 11 et 12. les deux cercles de 30 trous « Y » et « Z »; 13. les 56 trous d'Aubrey; 14. entrée secondaire. Le monument (cromlech) est situé à l'intérieur du cercle 12 : les mégalithes de grès « [sarsen](#) » sont en gris, et les « pierres bleues » en bleu.

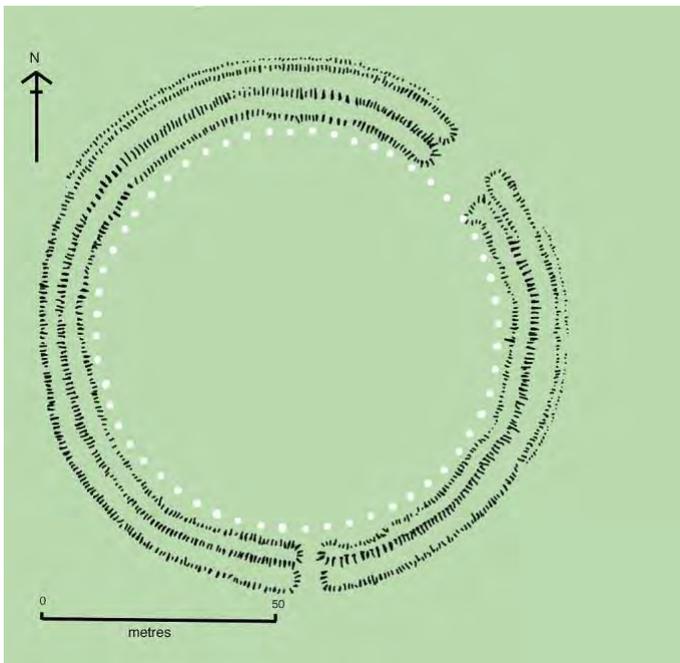
Stonehenge a été construit en plusieurs époques, ainsi que d'autres sites voisins :

1) Stonehenge I : Néolithique, vers -2800/-2100

Stonehenge I (-2800/-2100). Enceinte extérieure circulaire (fossé et talus), trous d'Aubrey (datation radiocarbone sur bois de cervidé au bas du fossé : $-2\ 810 \pm 120$); Heel Stone, pierres, structure en bois; crémations (datation sur charbon de bois, trou d'Aubrey : $-2\ 305 \pm 280$); Station Stones peut-être à la fin de cette période.

On y a découvert aussi « **l'archer de Stonehenge** », le squelette d'un homme de l'âge du bronze, délibérément et soigneusement enseveli dans le fossé extérieur, et non dans un tumulus (barrow), comme c'est le cas généralement dans la région. On a voulu voir en lui un archer en raison du bracelet de pierre et des silex et flèches trouvés à ses côtés. En fait, plusieurs pointes de flèches étaient fichées dans les os du squelette, ce qui semble nettement indiquer que l'homme a été tué par ces flèches. L'examen du squelette a montré que l'homme était originaire de la région et âgé d'environ 30 ans. La datation au radiocarbone laisse à penser qu'il est mort autour de -2300, ce qui le rend à peu près contemporain des autres « archers » découverts dans le voisinage, à Amesbury (archer d'Amesbury et Boscombe Bowmen). Ses restes sont maintenant conservés au Salisbury and South Wiltshire Museum de Salisbury.

Font également partie de Stonehenge I : **un enclos funéraire** ayant servi de cimetière à crémation ainsi que) les « **trous d'Aubrey** » qui sont un vaste cercle de 56 cavités de grandes dimensions, disposées régulièrement à l'intérieur et à peu de distance du talus de l'enceinte circulaire.



Les 56 trous d'Aubrey (en blanc)



La Heel Stone (« pierre-talon »)

De même, La **Heel Stone**, une pierre de grès du tertiaire, à l'extérieur de l'entrée nord-est, pourrait également avoir été érigée au cours de cette période, mais elle ne peut être formellement datée et peut aussi bien avoir été installée à n'importe quel moment de la phase III. Elle est brute et non taillée. Également une **structure en bois** avec un réseau complexe de trous de poteaux (postholes) a été relevé au centre du cercle et aux deux entrées du sud et du nord-est. Enfin, les **Station Stones** sont, comme la Heel Stone, des pierres de grès sarsen (grès courant en Angleterre) de dimensions modestes, situées à proximité des trous d'Aubrey et diamétralement opposées deux à deux.

2) Stonehenge II : Chalcolithique, vers -2100/-2000

Stonehenge II (-2100/-2000). Élargissement de la chaussée d'entrée et transfert des pierres vers les trous; creusement et remplissage du fossé de la Heel Stone; construction de la première section de l'Avenue (datation radiocarbone de bois de cervidé du fossé de la Heel Stone : -2190 ± 115 et -2135 ± 110); érection du double cercle de pierres bleues), inachevé (datation de bois de cervidé : -2000 ± 125).

Stonehenge II se compose essentiellement de l'avenue et du double cercle de pierres bleues.

L'« **Avenue** », large de 23 m (12 m entre les talus), part de la Heel Stone dans l'axe du monument, vers le nord-est, puis à mi-chemin du Cursus, long enclos mégalithique situé un peu plus au nord, s'infléchit vers l'est de manière très visible sur les photos aériennes et finit par rejoindre, à trois kilomètres de là et après un dernier virage à droite, la rivière Avon. **Le double cercle de « pierres bleues »** : deux cercles concentriques, chacun constitué de 38, ont été creusés au centre du site, à l'intérieur du cercle de sarsen actuel. Dans l'axe du monument, à l'« entrée », six cavités supplémentaires complètent l'ensemble, prouvant que le monument était déjà orienté au nord-est, vers le soleil levant du solstice d'été, avant la réalisation de la structure actuelle (phase III). Ces cavités ont probablement accueilli plus de quatre-vingts menhirs de « pierres bleues » constituant un premier cromlech, entièrement disparu (théoriquement : deux cercles concentriques de 38 menhirs et 6 menhirs supplémentaires à l'entrée, soit en tout 82 mégalithes). On sait depuis 1923 que toutes ces pierres proviennent des Preseli Hills, au Pays de Galles, à plus de 250 km. Le transport a pu être effectué entièrement par mer en contournant la péninsule de Cornouailles ou bien, depuis la région de Bristol, par voie fluviale et halage terrestre.

3) Stonehenge III : âge du bronze, vers -2000 / -1100

a) Stonehenge III a

Stonehenge III a (-2000). Transport des blocs de sarsen depuis la région de Marlborough; démantèlement du double cercle de pierres bleues; érection des trilithes de sarsen, du grand cercle de sarsen, de la Slaughter Stone ("pierre des sacrifices") et de son pendant (datation radiocarbone de bois de cervidé provenant de la rampe d'érection du pilier 56 : -2120 ± 160); gravures exécutées après l'érection des sarsens.

Démantèlement du double cercle de pierres bleues

L'étape suivante des travaux survient à la fin du III^e millénaire avant J.C., alors que partout en Europe, la grande période du mégalithisme est éteinte : toutes les pierres bleues sont d'abord retirées et mises à l'écart, laissant le terrain libre pour le nouveau projet. On voit alors s'ériger sur le site un complexe mégalithique exceptionnel de soixante-quinze monolithes (à l'origine), sur lesquels se concentrent encore aujourd'hui tous les regards des visiteurs.

Extraction et transport des blocs de sarsen

Les immenses monolithes, uniformément constitués de grès « sarsen » de l'Oligocène-Miocène, ont été extraits de carrières que l'on peut visiter librement, à 40 km environ au nord de Stonehenge ont été formés au-dessus de la craie par l'agglomération d'une couche régulière de sable siliceux dont ils ont gardé l'épaisseur relativement constante et les deux plans principaux naturellement parallèles. Le transport de ces monolithes, dont les plus gros pèsent environ cinquante tonnes, constitue une aventure d'ingénierie collective sans pareille. Une colline, au milieu du trajet, n'a pas facilité cette opération pour laquelle Atkinson ne propose rien d'autre que traîneaux, cordes et rouleaux de bois, occupant des milliers d'hommes durant des décennies.

Les trilithes

Les trilithons ou trilithes sont cinq groupes de trois monolithes de grès sarsen levés et disposés comme des portiques selon un plan en forme de fer à cheval laissant au nord-est une ouverture de 13,70 mètres de largeur. Les énormes pierres ont été travaillées sur le chantier à l'aide de boules de pierre qui laissent sur le grès dur les traces en vagues parallèles caractéristiques de cette méthode bien connue des civilisations de l'Égypte antique (obélisque inachevé). Puis les pierres ont été assemblées selon des techniques de charpente, par tenons et mortaises : chacun des dix piliers présente un tenon unique central en sa partie supérieure et les cinq linteaux, pesant jusqu'à cinquante tonnes, présentent chacun deux mortaises de forme ovale.

Les trilithes sont disposés symétriquement : les deux plus petites paires de trilithes atteignaient six mètres de hauteur, les suivantes 6,50 mètres, tandis que le grand trilithe unique du côté sud-ouest devait atteindre 7,3 mètres de hauteur, linteau compris. En partant de l'ouverture NE dans le sens des aiguilles d'une montre, les deux premiers trilithes sont les seuls qui nous soient parvenus intacts, tandis que le grand trilithe central est depuis longtemps effondré : le pilier du trilithe principal, haut de 6,70 mètres, a été redressé en 1901; l'autre gît au sol, brisé en plusieurs morceaux; le linteau est également renversé sur le flanc, montrant bien

les deux mortaises ovales de l'assemblage. Le linteau du quatrième trilithe, tombé en 1797, a été remis en place en 1956, comme le montrent les photos d'Atkinson; le dernier trilithe, quant à lui, est incomplet et brisé en plusieurs morceaux. Les piliers des trilithe sont disposés par paires très faiblement espacées; leur profil va diminuant vers le haut selon une courbe qui s'accroît nettement dans la partie haute, ce qui n'est pas sans rappeler le principe de l'entasis des anciens temples grecs, qui donne l'illusion de colonnes plus élancées et plus droites.

Le grand cercle de sarsen

Le grand cercle de grès sarsen est constitué de trente monolithes érigés en un cromlech de trente-trois mètres de diamètre et surmontés de trente linteaux. Chaque pilier comporte deux tenons correspondant aux deux mortaises ovales de chacun des linteaux, qui ont été mis bout à bout par un assemblage précis de rainures et languettes taillées en pointe : l'ensemble forme ainsi un anneau continu suspendu au sommet de la structure. L'effet visuel final a été le souci permanent des constructeurs, de même que pour les trilithe : les orthostats (pierres verticales) s'élargissent légèrement vers le haut, afin que, vue du sol, leur perspective demeure constante, tandis que les linteaux de pierre sont taillés légèrement en courbe, afin de conserver la disposition circulaire générale du monument. Chaque pilier présente sa meilleure face vers l'intérieur du cercle. La taille est plus rustique que celle des trilithe et les faces extérieures sont quasi brutes de carrière. L'épaisseur moyenne de ces pierres est de 1,10 mètres et la distance moyenne entre elles est d'environ un mètre. L'un des orthostats, au sud-est, est beaucoup plus petit que les autres, anomalie qui a fait couler beaucoup d'encre : on a voulu y voir une entrée latérale supportant des linteaux en bois... Atkinson suggère que l'on a dû s'accommoder d'un tel orthostat réduit, simplement par manque d'un élément disponible de plus grande taille. Toute la partie ouest du cercle est d'ailleurs manquante, et pendant longtemps les chercheurs pensaient que le chantier n'avait jamais été mené à son terme, les soixante monolithes nécessaires à l'achèvement du monument n'ayant pu être acheminés sur le site. Mais en 2013, la succession d'un printemps humide et d'un été chaud et très sec a révélé des traces d'herbe brûlée correspondant aux mégalithes aujourd'hui disparus, ce qui suggère que le chantier avait bien été achevé. Les orthostats mesurent près de 4,10 mètres de haut, 2,10 mètres de large et pèsent environ vingt-cinq tonnes. Les linteaux de pierre, quant à eux, mesurent chacun environ 3,20 mètres de long, un mètre de large, avec une épaisseur de 0,80 mètres : ils pèsent environ sept tonnes. Les sommets des linteaux sont suspendus, pour ceux qui le sont encore, à 4,90 mètres au-dessus du sol.

La Slaughter Stone (« pierre des sacrifices ») est un nom de fantaisie donné par les anciens explorateurs à une pierre de sarsen soigneusement taillée, longue de 7 m, autrefois levée, aujourd'hui tombée vers l'intérieur du monument, affleurant à peine, à proximité du talus. Elle faisait partie des deux, ou peut-être trois grands portails qui marquaient l'entrée nord-est.

b) Stonehenge III b

Stonehenge III b (-2000/-1550). Taille et érection des pierres bleues dans une nouvelle disposition circulaire; puis creusement et abandon des trous restés inachevés (datation radiocarbone de bois de cervidé de la base du trou 30 : -1540 ± 120).

Nouveau cercle de pierres bleues

Plus tard dans l'âge du bronze, les pierres bleues, récupérées des cavités délibérément remblayées, semblent avoir été réérigées une première fois à l'intérieur du cercle des sarsens, bien que les détails exacts de cette période ne soient pas encore très clairs. Quelques-unes d'entre elles ont été travaillées dans le style des constructions en bois, tout comme les sarsens eux-mêmes, ce qui suggère qu'elles pourraient avoir été liées par des linteaux et avoir fait partie d'une structure plus vaste au cours de cette période.

Les trous Y et Z

Il existe à l'extérieur du cercle de sarsen deux cercles un peu irréguliers de chacun trente grandes cavités, correspondant à chacun des 30 piliers du cercle de pierre et disposés en couronne tout autour d'eux. Ces trous, découverts et fouillés pour la moitié d'entre eux par Hawley en 1923, ont été rebouchés et sont peu visibles de nos jours; deux autres ont été fouillés et étudiés minutieusement par Atkinson en 1953; les autres, non fouillés, mais bien repérés, sont absolument indécélables par les visiteurs. Leur forme rectangulaire aux parois verticales (dimensions moyennes : 1,80 x 1,20 mètres; profondeur uniforme :

1,05 mètres pour le cercle Z et 0,92 mètre pour le cercle Y), leur aspect inachevé et leur contenu (terre, fragments de rhyolite et de grès sarsen, fond garni de silex brut) montrent qu'il s'agit très probablement d'un projet avorté de réorganisation des pierres bleues à l'extérieur du cercle de sarsen.

L'Altar stone (« pierre d'autel »)

C'est sur le plan tracé par Inigo Jones en 1620 qu'apparaît ce nom de « pierre d'autel » pour désigner le bloc de six tonnes de grès vert micacé du Silurien-Dévonien qui brille au soleil et mesure 4,20 x 1 x 0,50 m, soit deux fois la hauteur des pierres bleues. Ce grès vert provient très vraisemblablement du Pays de Galles, où il existe plusieurs gisements d'une telle roche. Son nom de pierre d'autel et sa position horizontale, coincée sous les éléments tombés à terre du trilith principal peuvent prêter à confusion quant à sa destination première. En fait, elle peut fort bien avoir été dressée, formant un menhir de nature unique dans un endroit unique, au beau milieu du monument.

c) Stonehenge III c

Stonehenge III c (-1550/-1100). Démontage de la précédente structure de pierres bleues; réédification des pierres bleues en un cercle et un ovale concentriques, comme on peut encore en voir certaines aujourd'hui. Cette phase a connu une nouvelle réorganisation des pierres bleues de dolérite, qui ont été placées en cercle entre les deux structures de sarsens et en ovale en plein centre du monument.

Les pierres bleues réorganisées en un dernier cercle

Le cercle, tel qu'il se présente aujourd'hui, est très incomplet : six pierres sont plus ou moins intactes et dressées à la verticale; cinq sont penchées, huit sont à terre, entières ou fragmentaires, et dix sont réduites à des moignons en sous-sol. Leurs formes sont variées, plus ou moins en forme de colonnes, certaines brutes d'extraction, d'autres plus travaillées. Deux d'entre elles sont d'anciens linteaux soigneusement taillés, ayant fait partie d'une structure incurvée et présentant des mortaises ovales analogues à celles relevées sur les grands linteaux de sarsen. Chaque pierre bleue mesure environ deux mètres de hauteur, entre 1 et 1,5 mètres de largeur et jusqu'à 0,80 mètre d'épaisseur. Il est possible que ce cercle final ait été composé d'une soixantaine de pierres bleues.

L'ovale des pierres bleues, finalement réduit en fer à cheval

L'aspect de cette ultime structure qui se dresse au centre du monument, à environ un mètre à l'intérieur du grand fer à cheval de sarsen, est tout différent de celui du précédent cercle de pierres bleues : elles sont cette fois soigneusement disposées à intervalles réguliers, à tel point qu'on peut établir qu'elles ont formé une structure ovale comptant dix-neuf pierres, dont des trilithes. Six d'entre elles sont encore dressées à la verticale, une autre est en position inclinée, et plusieurs autres sont à l'état de fragments. Elles ont toutes été travaillées avec beaucoup de soin en piliers quadrangulaires; l'une d'entre elles, qui présente à son sommet un tenon arasé, a fait à coup sûr partie d'un ancien trilith, tandis que deux autres présentent curieusement, l'une une feuillure, l'autre une rainure creusée tout du long, qui suggèrent que ces pierres, à un certain moment, se sont emboîtées latéralement pour un usage inconnu. Pour finir, la section nord-est de l'ovale des pierres bleues a été enlevée, créant une structure en fer à cheval qui reproduit la forme de la structure centrale des trilithes de sarsen.

d) Dernière étape

Stonehenge IV (-1100). Extension de l'Avenue jusqu'à l'ouest d'Amesbury (datation au radiocarbone d'os et de bois de cervidés des fossés situés à l'ouest d'Amesbury : -1 075 ± 100).

On a aussi retrouvé le squelette d'un jeune garçon (date calibrée -780 / -410). Une large tranchée enroulée en arc, qui s'approfondit vers l'E-N-E en direction de la Heel Stone, est datée de la fin -VII^e / -VI^e siècle.

e) Abandon du site

Destruction délibérée du monument au cours des premiers siècles de notre ère.

Des monnaies romaines ont été retrouvées, ainsi que la tombe d'un Saxon décapité, datée du VII^e siècle.

Études et fouilles archéologiques - Premières études

La première représentation réaliste de Stonehenge figure dans la *Corte beschryvinghe van England Scotland ende Irland* (vers 1567-1577) de Lucas de Heere. La première mention écrite de Stonehenge est celle donnée de manière malheureusement peu explicite par l'historien grec Diodore de Sicile : « Il y a au-delà de la Celtique, dans l'Océan, une île qui n'est pas moins grande que la Sicile. Cette île, située au nord, est habitée par les Hyperboréens, ainsi nommés parce qu'ils vivent au-delà du point d'où souffle Borée. (...) On voit dans cette île une vaste enceinte consacrée à Apollon, ainsi qu'un magnifique temple, de forme ronde, orné de nombreuses offrandes ». On ne voit pas à quel autre ensemble de monuments qu'Avebury et Stonehenge on pourrait identifier une telle description. Le Moyen Âge voit en Stonehenge une danse des géants ou une œuvre du diable, avant que les « antiquaires » du XVII^e siècle ne lui attribuent une origine plus humaine et, en bons scientifiques, ne commencent à mesurer et dessiner. En 1621, le roi Charles I^{er} se fit accompagner sur les lieux par son architecte favori Inigo Jones qui exécuta un croquis du monument restitué, où figurent en bonne place les fossés, le cercle de sarsens et les trilithes. En 1626, ce fut au tour de John Aubrey de composer un livre intitulé *Templa druidum* et de dresser un plan d'une bonne précision. L'exigence scientifique s'accroît avec les recherches de William Stukeley, ami de Newton, qui, en 1740, publie un livre attribuant Stonehenge au druidisme, opinion encore solidement ancrée dans les croyances populaires britanniques. Malgré des mesures précises et des observations rigoureuses, sa reconstruction géométrique du monument, à la règle et au compas, apparaît aujourd'hui très idéalisée. Un peu plus tard, en 1747, John Wood continue à attribuer Stonehenge aux druides.

Fouilles et recherches du XX^e siècle

Les recherches furent menées successivement durant la première moitié du XX^e siècle par le professeur Gowland, qui releva le montant 56 du trilithe central, et le colonel Hawley, qui n'hésita pas à décaper la moitié du site. Enfin, à partir des années 1950, le préhistorien Richard J. C. Atkinson et ses collègues, les professeurs Ernest Stuart Piggott et John F.S. Stone, reprirent les fouilles et rassemblèrent de très nombreuses observations, assorties des premières datations scientifiques au radiocarbone. Pour clore leur campagne, ils remirent en place et consolidèrent, en 1957, les éléments les plus récemment écroulés (piliers et linteaux 57-58 et 22-122), avec les moyens modernes du génie civil. La dernière restauration a été effectuée en 1963.

Fouilles et recherches du XXI^e siècle - Recherches de 2003 à 2008

De nouvelles fouilles ont été menées entre 2003 et 2008 par une équipe dirigée par Mike Parker Pearson, sous le nom de Riverside Project. Ce projet visait principalement à établir les relations pouvant exister entre Stonehenge et les monuments associés, notamment Durrington Walls, où a été découverte une autre Avenue, beaucoup plus courte, menant à la rivière Avon. Le point où l'Avenue de Stonehenge rencontre la rivière a également été fouillé : il a révélé une construction circulaire jusque-là inconnue, comprenant un ensemble de quatre pierres qui marquaient probablement le point de départ de l'Avenue. En avril 2008, Tim Darvill, de l'Université de Bournemouth et Geoff Wainwright, de la Société des Antiquaires, ont commencé une autre fouille à l'intérieur du cercle de Stonehenge pour tenter de récupérer des fragments datables autour des pierres bleues. Ils ont réussi à dater l'érection de certaines pierres bleues à 2300 av. J.-C. Ils ont également découvert des matières organiques datables à partir de 7000 av. J.-C., ce qui, s'ajoutant aux trous de poteaux mésolithiques, renforce l'idée que le site a été utilisé au moins 4000 ans avant le monument de Stonehenge.

Étude cartographique de 2010

En juillet 2010, la mission cartographique Stonehenge New Landscapes Project a mis au jour fortuitement, par des techniques de magnétométrie, les vestiges d'un monument cérémoniel à moins d'un kilomètre du cercle principal. Il comprend un fossé segmenté avec des entrées nord-est/sud-ouest, en opposition, avec des fosses internes qui font jusqu'à un mètre de diamètre et qui aurait pu avoir une structure en bois. Ce monument semble être contemporain de Stonehenge et avoir la même orientation.

Étude géologique de 2011

Le 18 décembre 2011, des géologues de l'Université de Leicester et le Musée National du Pays de Galles ont annoncé avoir déterminé l'origine exacte de certains fragments de rhyolite trouvés dans le débitage de

Stonehenge : il s'agit d'un éperon rocheux de 70 mètres, appelé Craig Rhos-y-Felin, situé à proximité de Pont Saeson, à 220 km de Stonehenge.

Découvertes de 2015

La détection d'un monument mégalithique enterré, constitué de 90 pierres dépassant 4,50 m de hauteur, sur le site de Durrington Walls, à moins de 3 km du site de Stonehenge, a été annoncée en septembre 2015. L'âge de ce monument serait de 4500 ans.

D) Les alignements de Carnac



Les alignements de Carnac sont des ensembles de pierres dressées en lignes parallèles; ils s'étendent sur plus de 4 kilomètres et comptent 2 934 menhirs ou pierres dressées (menhir signifie pierre longue). On en dénombre trois groupes successifs : les alignements du Méneac (1 170 menhirs), ceux de Kermario et ceux de Kerlescan. On a la quasi-certitude que le nombre des menhirs était bien plus élevé et que ceux-ci atteignaient la rivière de Crach en se répartissant sur 8 kilomètres. Un cromlech (constitué d'un cercle de menhirs) semi-circulaire précède l'alignement du Méneac dont les pierres atteignent des hauteurs de 4 mètres au maximum (mais certains menhirs bretons sont bien plus hauts) à 0,60 m. 240 mètres séparent l'alignement du Méneac de celui de Kermario; celui-ci est précédé d'un dolmen, et ses pierres ont de 6,40 à 0,50 m. 390 mètres plus loin, on dresse l'alignement de Kerlescan qui est, comme le Méneac, précédé d'un cromlech semi-circulaire, et dont les pierres ont une hauteur qui varie de 4 à 0,80 m.

Les alignements de Carnac ont sans doute été construits vers 3000 avant J.-C. On pense qu'ils comptaient alors environ 10 000 menhirs. Il s'agit vraisemblablement de monuments religieux, associés au culte des morts. Ce qui est la fonction du menhir isolé; mais « Carnac » signifie aussi « le lieu des carn(s) », et *carn*, dont le génitif *cairn* est passé en français et en anglais, est un mot celtique qui désigne « un amas de pierres sur une tombe ou un amas de pierres évoquant une mort ». *Carn* a encore ce sens en irlandais moderne. En outre, l'orientation particulière de chacun des groupes (les pierres de Kerlescan sont orientées sur les levers d'équinoxe, celles de Kermario sur ceux du solstice d'été, celles du Méneac sur les levers intermédiaires), joint au fait que certains autres alignements sont eux aussi orientés, que les pierres du fameux cercle mégalithique de Stonehenge (Wiltshire, Angleterre) le sont de même, qu'enfin certains menhirs isolés sont troués, montre que le culte solaire était sans doute associé à ces rites. Il n'y a nullement antinomie entre ces destinations diverses, mais on ne peut rien affirmer de certain sur la fonction précise des menhirs.



La plupart des mégalithes de Carnac sont des menhirs, mais il y a aussi quelques dolmens, dont le but funéraire ne fait guère de doute



Les raisons qui ont amenés les « bâtisseurs » de Carnac à édifier ces alignements restent encore très mystérieuses. Les fouilles ont néanmoins démontré que les destinations essentielles de ce site étaient certainement d'ordre funéraire (culte des morts) pour les populations qui s'y étaient sédentarisées. On y a également retrouvé des traces de culture agricoles et des tombes. Il est possible, mais non certain, qu'un culte « solaire » ait été également une motivation des populations locales, pré-gauloises.

E) Kokino

Kokino est un site archéologique et un observatoire astronomique datant de l'âge du bronze. Il se trouve près du village de Kokino, dans la municipalité de Staro Nagoritchane, dans le nord-est de la République de Macédoine.

Kokino est le nom du village qui se trouve près de la localité archéologique appelée « Tatitchev Kamen » au Nord-Est de la République de Macédoine. Les fouilles archéologiques ont mis en lumière que ce site a été utilisé comme une montagne sacrée. Les recherches des astrophysiciens bulgares ont montré que le site a été aussi utilisé comme observatoire astronomique. Les fouilles archéologiques continuent et montrent que la localité a été utilisée de l'âge du bronze ancien jusqu'à l'âge du fer, la période dont date une agglomération modeste. L'âge du bronze moyen a livré le plus grand nombre d'artefacts (vaisselle en céramique et pierres-moulins de blé trouvées dans les structures rituelles). Ce site est l'un des plus riches pour l'âge du bronze en République de Macédoine. Le site fait 50 mètres sur 100 et il est orienté sur un axe est-ouest. La montagne Tatitchev Kamen est formée de roches volcaniques et plusieurs éléments ayant appartenu à un volcan y sont visibles, comme un neck et un dôme de lave. Ces roches volcaniques se brisent facilement, en formant des cubes presque parfaits, idéaux pour la construction.

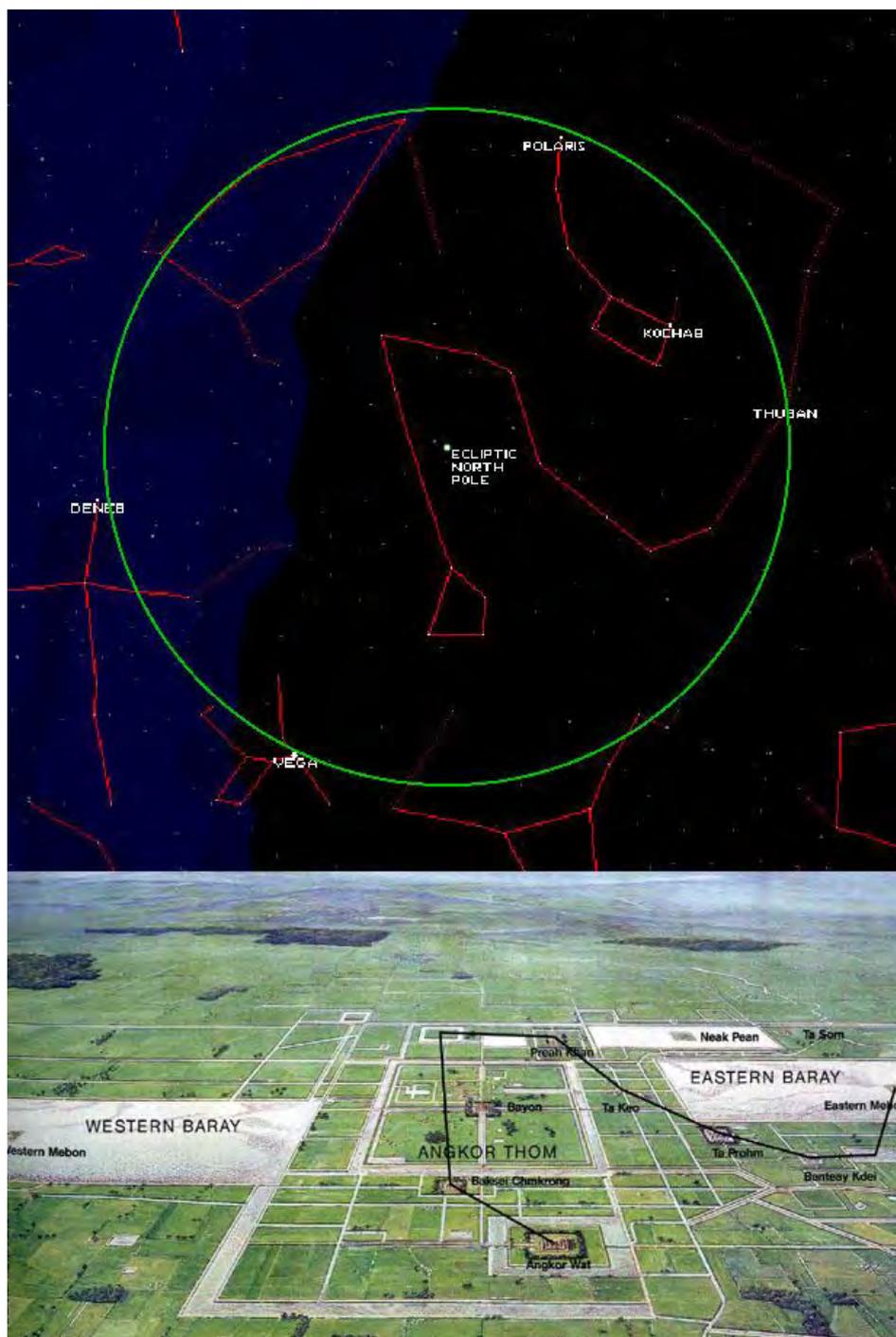
Les éléments essentiels de l'observatoire sont répartis entre deux plateformes, séparées par 19 mètres de hauteur. La plateforme inférieure est dominée par quatre sièges de pierre, placés en rang du côté ouest et orientés dans un axe nord-sud. Pour l'archéologue Jovica Stankovski qui découvrit le site début 2001, et l'astronome Gjorgji Cenev de l'observatoire de Skopje, cet observatoire mégalithique daterait de l'âge du bronze ancien soit de plus de 3800 ans. Le site fut longtemps habité, il rejette encore en surface de nombreux fragments de céramique.

F) Angkor Wat (Cambodge)

Angkor, au Cambodge, est un site exceptionnel de beauté artistique et spirituelle. C'est en outre l'un des sites archéologiques les plus impressionnants et probablement le plus vaste. Il s'étend sur plus de 400 km² ! (40.000 hectares), près de la ville de Siem Reap et comprend une multitude de temples, la plupart très abimés. L'effet de la jungle luxuriante qui tente de reprendre ses droits sous ce climat tropical est assez dévastateur.

Bien que l'actuel site d'Angkor ait été construit entre les IX^e et XV^e siècles de notre ère et ne devrait donc pas figurer dans la partie « préhistoire » de ce document, il se trouve ici en raison du fait que la NASA le classe en cinquième position dans les plus vieux sites astronomiques du monde. Notons néanmoins que le site a quand même été occupé il y a environ 4000 ans (cf. infra). Il faut aussi remarquer que si le site d'Angkor est mondialement connu pour les beautés architecturales et les sculptures d'un art khmer alors à son apogée, marqué par des influences bouddhistes et indouhistes, il est évidemment nettement moins connu en tant que site « astronomique », bien que cet aspect soit très intéressant !

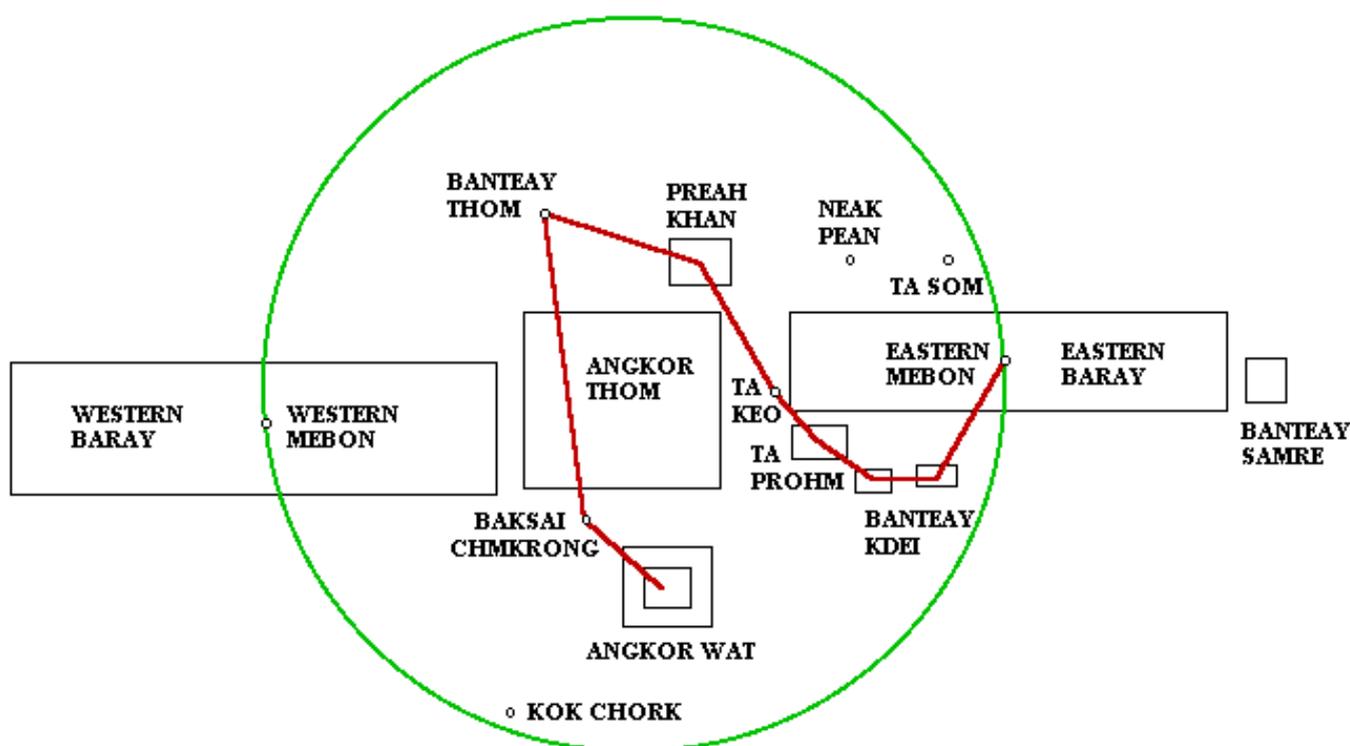
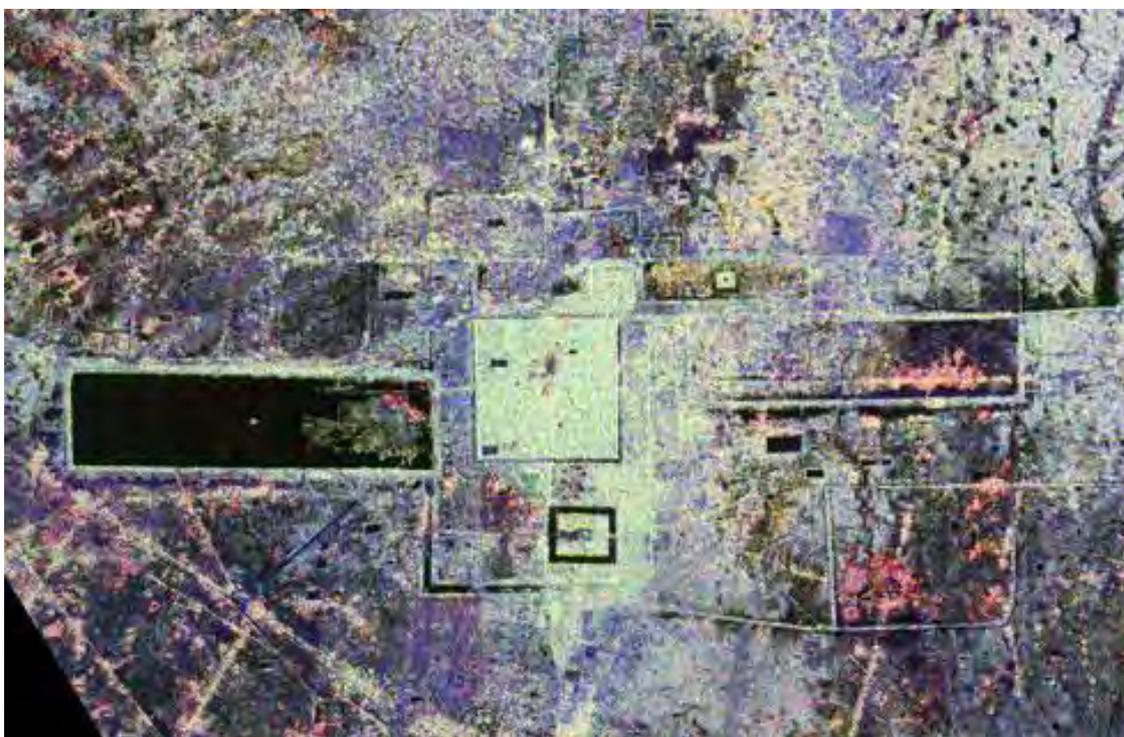
L'histoire retient le IX^e siècle pour la fondation d'Angkor, rayonnante capitale du Sud-Est asiatique pendant plusieurs siècles, les ruines de ce site cambodgien ne seraient que la partie monumentale connue d'une présence remontant à l'âge du bronze et révélée la nécropole de Koh Ta Méas, datée d'au moins 1800 avant notre ère. Pas moins de vingt-sept sépultures ont été dégagées, avec leurs nombreuses offrandes. Les squelettes humains des cinquante-neuf individus identifiés sont d'une grande valeur pour la connaissance du peuplement préhistorique du Sud-Est asiatique continental. Celle-ci révèle une population peu robuste, qui a cependant développé une résistance immunitaire à la malaria.



En 1998 Graham Hancock et John Grigsby ont montré une corrélation entre les temples du site d'Angkor Thom et de la constellation du Dragon. Le diagramme ci-dessous montre le chemin du pôle Nord céleste autour du pôle Nord écliptique, aux mêmes endroits que les principaux temples autour de Angkor Thom. Au sol, la position d'Angkor Thom correspond à celle du pôle Nord écliptique dans le ciel. Les temples Mebon Ouest, Mebon Est et Ta Som ont la même position spatiale relative par rapport à Angkor Thom qu'ont Deneb, Thuban et Kochab avec le pôle Nord écliptique.

Le mouvement du pôle Nord céleste montre l'aspect du cycle des 25.800 ans de la précession des équinoxes. Puisqu'Angkor est situé sous les tropiques, les étoiles septentrionales sont basses vers l'horizon Nord. En ce moment Polaris (l'étoile polaire) est proche du pôle Nord céleste. En 11.500 avant J.C. Véga était l'étoile polaire et le Dragon était aligné avec les temples d'Angkor au-dessus de Véga et au-dessus de l'horizon.

La photo ci-dessous suppose que la zone au Nord d'Angkor est dégagée, comme ça devait être le cas quand les temples furent construits, mais aujourd'hui c'est plus une jungle. Les images satellites ont été utilisées autour d'Angkor, dont cette photo qui montre ce qui apparaît comme des ruines au Nord-Est d'Angkor Thom avec une position et une distance correcte pour représenter Polaris.



*La photo ci-dessus est trop au Nord pour y voir Kok Chork.
Le dessin montre que Kok Chork est en position correcte pour représenter Vega*

II L'astronomie de l'Antiquité

À ses débuts, l'astronomie consiste *simplement* en l'observation et la prédiction du mouvement des objets célestes visibles à l'œil nu : cela constitue l'astronomie prételescopique. Néanmoins nous devons à différentes civilisations de nombreux apports et découvertes.

La plus vieille éclipse de Lune dont la mention nous soit parvenue est celle du 17 janvier 3380 av. J.-C., qui aurait été décrite par les Mayas en Amérique centrale. Cette reconstitution est cependant contestée, dans la mesure où la théorie communément admise pose que le peuple maya n'a pu mettre en œuvre son calendrier avant 3373 av. J.-C., au plus tôt. On n'a pas à ce jour trouvé d'indications attestant d'une utilisation antérieure. En Chine, la date de la première éclipse de Soleil mentionnée est datée de 2137 av. J.-C. Les Égyptiens et les Mésopotamiens vénéraient eux aussi des divinités célestes et s'adonnaient à l'observation des cieux. La première observation d'une éclipse solaire en Mésopotamie est attestée le 6 juin 763 av. J.-C.

Il faut remarquer que les premiers signes de l'apparition de certaines civilisations intervient parfois avant ce qu'on appelle traditionnellement « l'Antiquité », à l'image des constructions néolithiques de la préhistoire (Goseck, Nabta Playa, Stonehenge, etc.). Il y a parfois chevauchement entre la préhistoire et l'antiquité. Nabta Playa se situait en Nubie, pays qui deviendra ultérieurement la « Haute Égypte ». Les habitants sédentarisés qui étaient à Nabta Playa sont légitimement une branche ancestrale des égyptiens dynastiques. Dans notre esprit, ce qui peut faire la différence entre la préhistoire et l'antiquité vient de deux éléments concomitants : 1) **une société politiquement et socialement structurée et organisée**, ce qui repose aussi nécessairement sur 2) **une forme d'écriture** !

A) Dans le bassin méditerranéen

1. En Égypte

Pour les égyptiens de l'antiquité, l'aspect du ciel a toujours revêtu une signification mythologique, religieuse et symbolique. Toutefois, les observations astronomiques n'avaient pas une finalité astrologique aussi prononcée dans la civilisation égyptienne qu'en Mésopotamie.

Pour établir un lien entre l'astronomie égyptienne et celle que nous avons hérité directement des gréco-romains et que nous utilisons encore de nos jours, on peut se baser sur la mythologie égyptienne pour dresser la liste des divinités en relation avec notre système solaire :

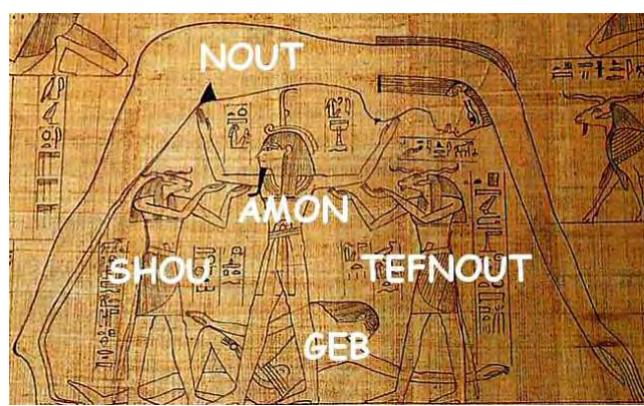
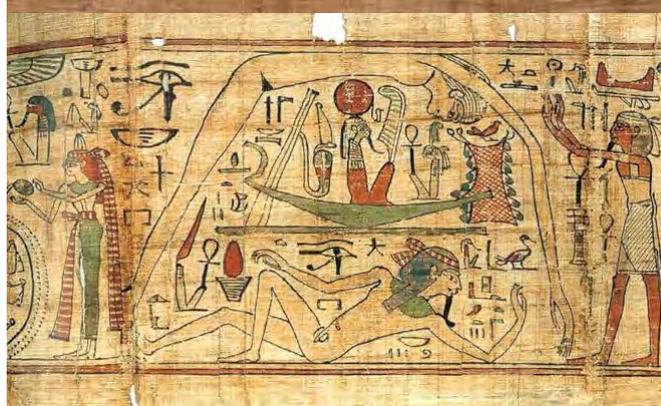
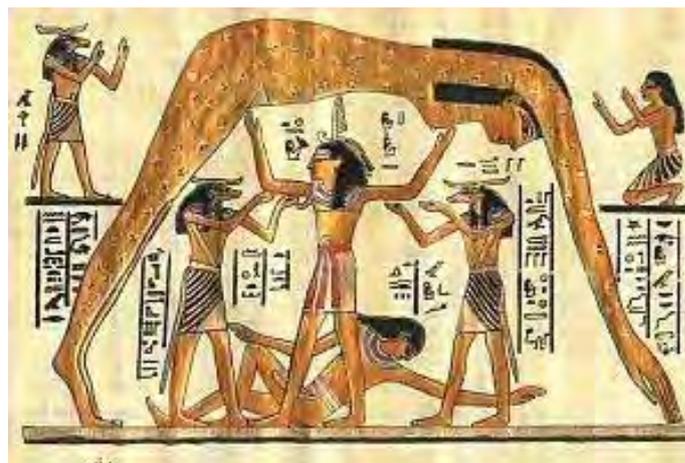
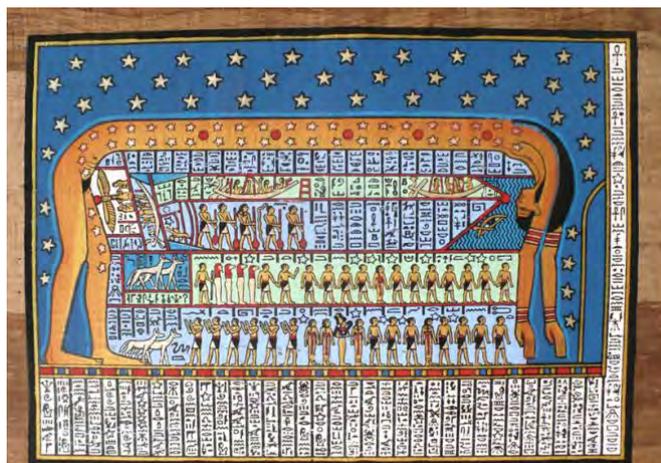
- Le Soleil était représenté par l'Oiseau Bénou.
- Mercure était représenté par Thot
- Vénus était représentée par Hathor
- La Terre était représentée par Geb
- La Lune était représentée par Isis
- Mars était représenté par Seth
- Jupiter était représenté par Horus
- Saturne était représenté par Osiris

La différence fondamentale entre notre culture gréco-romaine et l'égyptienne, c'est que la plus ancienne visualisait le ciel comme étant féminin par le biais de la déesse Nout et la Terre était masculine sous les traits de Geb, et c'est le contraire dans la culture occidentale.

Noût, le ciel étoilé

Pour expliquer le choix d'un corps féminin en tant que concept du ciel et de l'espace où se meuvent les astres, il suffit de savoir que culturellement les anciens égyptiens se servaient aussi du concept de la procréation en rapport avec les énormes distances cosmiques dans l'espace. Les Anciens Égyptiens comparaient les étoiles aux grains de sable du désert, c'est ainsi qu'ils se visualisaient, microscopiques dans un univers macroscopique, agglutinés sur l'ovule qui pour eux, était comme la Terre dans le voisinage du Soleil et qui circule dans le ventre de Noût de son sexe à sa bouche. Sa bouche étant symbolisée par la

nourriture nécessaire à l'alimentation du fœtus solaire qui naîtra de son entre-jambes, Noût était tantôt représentée par une femme, tantôt par une vache, d'où le lien avec l'alimentation par son lait qui forma la voie lactée. Il existe une représentation de la Vache Noût, tétée par un Pharaon. Ce Pharaon de manière imagée représentait l'Humanité toute entière, que la Déesse Mère Noût tient sur ses cuisses et allaite, d'où la taille adulte du nourrisson qu'elle semblait tenir dans ses bras, il ne s'agit pas d'un bébé mais bien d'un adolescent ou adulte. A cet âge-là, on ne tète plus sa mère mais c'est là juste une image permettant de comprendre que les Anciens Egyptiens percevaient le ciel étoilé comme une mère qui veillait sur eux car elle leur avait donné naissance. Cette vision féminine et biologique du ciel n'est pas sans intérêt, en effet, accoucher du soleil signifie qu'il sort du corps de Nout et qu'ensuite il évolue progressivement dans une trajectoire forcément semi-circulaire jusqu'à la bouche de Nout. Elle est représentée courbée et, une fois arrivé dans sa gorge, le soleil progresse à nouveau dans une trajectoire semi-circulaire jusqu'à son vagin, pour être accouché de nouveau. Le corps de cette déesse représentait ce qu'on nomme la voûte céleste imaginaire représentée par les quatre membres bras et jambes qui servent de piliers.



Quelques représentations de Noût

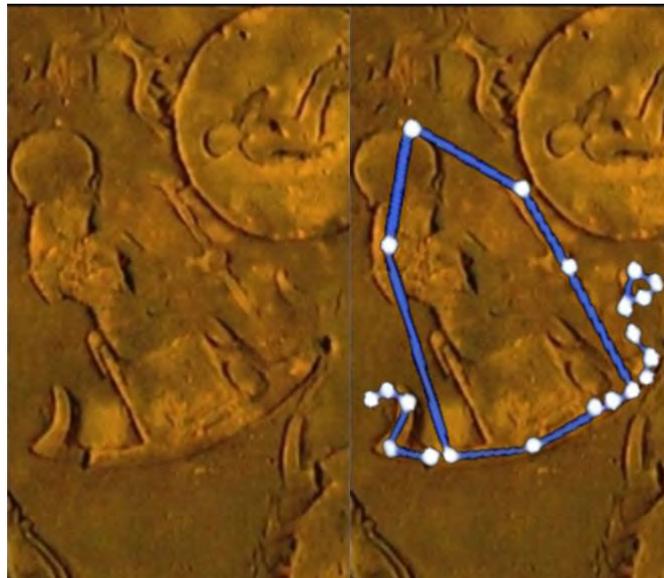
Formes des constellations

Il semble que l'origine de la forme de nos actuelles constellations trouve sa source dans l'Ancienne Égypte.

Un autre exemple de l'origine égyptienne de la forme des Constellations est visible sur le Zodiaque de Denderah, où sont recensés plus de 48 constellations dont la Constellation de Ophiuchus (dit le Serpenteaire) ci-dessous.



Le Zodiaque de Denderah. La flèche pointe vers le détail.



À gauche, le détail.

À droite, le même détail avec le dessin de la constellation.

*Détail sur le Zodiaque de Denderah (Ophiuchus)
Provenant du livre « Les Voleurs d'Étoiles ou le Secret du Zodiaque de Denderah » écrit par A.N.K.*

La constellation Ophiuchus y est représentée sous la forme du dieu Râ, patron des médecins, assis sur une barque dont les extrémités de celle-ci sont représentées par la tête et la queue d'un serpent, les constellations Serpens Cauda et Serpens Caput.

Il semble, selon le travail de recherche mené par A.N.K., auteur de plusieurs enquêtes sur des artefacts antiques, que les Grecs se soient volontairement inspirés de la représentation égyptienne de base de la forme des constellations, mais les grecs ont superposé les personnages de leur propre mythologie sur l'emplacement des Constellations égyptiennes. Ainsi, actuellement et depuis quelques siècles, nous n'observons pas le ciel tel qu'il est, mais nous le percevons à travers les yeux de la mythologie gréco-latine. Cette vision grecque est particulière parce qu'elle nous induit en erreur d'un point de vue zoologique. En effet, les ours n'ont pas de grande et longue queue, pourtant, c'est sous cette apparence que la Grande et Petite Ourse sont dessinées dans les lignes de ces constellations. Ce qui est intéressant avec la vision égyptienne, **c'est qu'il semble que les divinités égyptiennes soient apparues en fonction de la forme des Constellations**. Selon Diodore de Sicile dans son livre Histoire Universelle, tome premier, livre I, chapitre IX "... la tradition place en Égypte la naissance des dieux, les premières observations astronomiques...", par dieux, il faut comprendre, l'imagerie des constellations. Des divinités majeures comme Taouret la déesse hippopotame représentée par la constellation de Draco (le Dragon), était déjà présente dès l'aube de la civilisation de l'ancienne Égypte, comme en témoignent divers artefacts représentant Taouret. Les anciens égyptiens se seraient donc inspirés des constellations pour créer leur panthéon divin.

Perception du ciel étoilé

La nuit commençait avec le crépuscule et se terminait avec le lever du Soleil. Les douze étoiles servant à la division de la nuit en heures étaient associées aux « douze gardiens du ciel » censés accompagner les pharaons défunts dans leur voyage nocturne avec Rê, la divinité solaire. Contrairement à leur importance dans les décans du zodiaque, les constellations ne jouent pratiquement aucun rôle ici. La plus ancienne représentation du ciel étoilé a été retrouvée peinte sur la planche inférieure d'un cercueil d'Assiout et datant de la première période intermédiaire égyptienne. Les principes astronomiques sont aussi à l'œuvre dans la disposition des bâtiments sacrés, notamment celle des pyramides. Mais rien ne nous a été transmis des méthodes utilisées, et les avis sont partagés.

À l'époque romaine, Clément d'Alexandrie, dans un écrit, donne une idée de l'importance des observations astronomiques associées aux rites sacrés. De rares documents nous permettent d'appréhender les sciences égyptiennes, plus particulièrement en ce qui concerne la médecine et les mathématiques. L'astronomie égyptienne a pu bénéficier d'une meilleure attention grâce aux nombreux monuments témoignant de rites funéraires associés à la position des étoiles. Pourtant, cette profusion de documents astrologiques, bien que dévoilant certains aspects complexes de l'astronomie égyptienne, ne permet pas, de par leur rôle strictement religieux, de conclure quant à l'étendue et aux lacunes de leurs connaissances.

Calendrier égyptien

Dans le calendrier égyptien, Sirius joue un rôle important, son lever héliaque ayant été mis en parallèle avec la crue annuelle du Nil. Comme l'année égyptienne fait exactement 365 jours, la date de la crue du Nil se déplace progressivement dans le calendrier, et le lever héliaque de Sirius ne revient plus qu'une fois tous les 1460 ans à la même date du calendrier égyptien. Mais à l'origine, il semble que Sirius ait présidé à la tenue des *festivités de Thèbes*. Une réforme de -150 établit un calendrier amélioré, avec une année de 365,25 jours, préservant ainsi la maîtrise des prêtres sur le calendrier. Les instruments de mesure du temps telles que les clepsydres sont intimement liés à l'astronomie. Celles-ci furent sans doute élaborées afin d'étudier la position des astres durant la nuit. Les représentations cosmologiques de la clepsydre de Karnak traduisent bien cet aspect.

a) Observatoires astronomiques de la période pré-dynastique

Le Sahara égyptien recèle les vestiges d'un site néolithique qui apporte des éléments nouveaux à l'histoire de l'astronomie tant égyptienne que mondiale. Situé à Nabta Playa, c'est durant plusieurs millénaires qu'une population sédentaire s'y développa, élevant de nombreux monuments tels que tumuli, statues et champs mégalithiques. L'élément le plus remarquable du site, antérieur de Stonehenge de plus de mille ans, est un cromlech à vocation astronomique d'une superficie de 49 m² et datant de -4.000 environ. ([voir « Nabta Playa » au chapitre I sur la préhistoire](#)).

Le cercle était un calendrier destiné à marquer le solstice d'été. Mais d'autres alignements ont pu être corrélés avec la position d'étoiles aux alentours de - 4.000. Ceux-ci, totalisant vingt-quatre mégalithes, pointaient en direction d'étoiles culminantes, en particulier Sirius, Dubhe et la ceinture d'Orion.

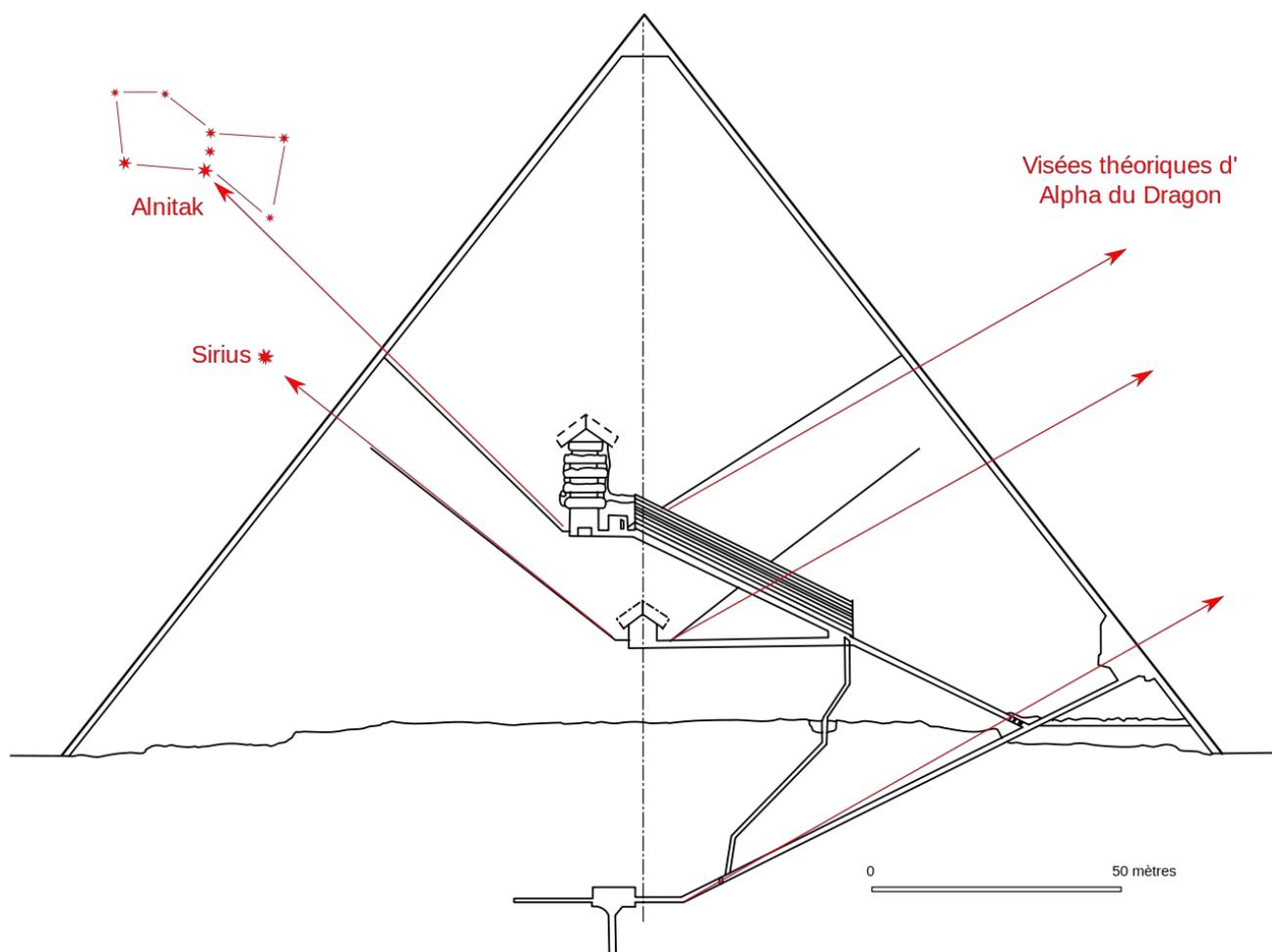
b) Les pyramides de l'Ancien Empire

La IV^e dynastie qui fait partie de l'Ancien Empire, est la dynastie qui a laissé les plus célèbres de tous les monuments : les pyramides de Gizeh et le Sphinx. Elle couvre une période d'environ -2670 à -2450 et débute sous le règne de Snéfrou, père de Khéops.

Les premières grandes pyramides à faces lisses ont la propriété d'être orientées suivant les quatre points cardinaux. Le record de la précision est obtenu avec la pyramide de Khéops où il y a une erreur minimale de 3'. Cette performance fut obtenue avec des moyens très rudimentaires. Le but à atteindre était de déterminer la direction du nord géographique. Pour ce faire, une méthode simple a été envisagée : les Égyptiens visaient une étoile dans le nord et divisaient l'angle formé par sa position au lever, la position de l'observateur et la position de l'astre au coucher. L'observateur, situé au centre d'un enclos circulaire, utilisait deux instruments de visée appelés le *bay* et le *merkhet* dont on a retrouvé deux exemplaires. C'est l'orientation des monuments qui témoigne aujourd'hui, plus que les rares documents dont on dispose, du savoir astronomique des anciens Égyptiens. L'entrée de toutes les pyramides étaient situées sur la face nord (à l'exception de la pyramide rhomboïdale de Dachour possédant une seconde entrée à l'ouest). Celle-ci permettait à l'âme du défunt de s'orienter vers la région polaire du ciel. Les Égyptiens nommaient d'ailleurs les étoiles circumpolaires, *les impérissables*, puisque celles-ci restaient visibles toute la nuit, ne descendant jamais sous l'horizon.

Quelques auteurs avancent diverses hypothèses impliquant d'autres données astronomiques et qu'il est impossible de vérifier, les éléments archéologiques faisant défaut. La plus connue et la plus relayée par la presse est la supposée corrélation d'Orion, faisant du groupe de Gizeh, un plan unique dont le dessein était de représenter la ceinture de la constellation d'Orion, constellation très importante aux yeux des égyptiens. Ce serait négliger les faits historiques. Les 3 pyramides de Gizeh sont celles de Khéops, Khéphren et

Mykérinos (ce sont les noms grecs de ces pharaons qui s'appelaient en réalité : Khoufou, Khafrê et Menkaourê). Dans cette période ce ne sont pas trois mais cinq souverains qui se sont succédés dans des contextes mêlant rivalités et convoitises. Il serait très étonnant que les troubles de l'histoire n'aient eu aucun impact sur un projet planifié sous le premier de ces pharaons, c'est-à-dire Khéops. De plus, l'analyse de chaque pyramide dévoile que chacune a connu de multiples changements de plans, dans sa structure interne et/ou au niveau de l'implantation au sol. Un projet unique semble, dès lors, peu concevable.



Étoiles « visées » par les conduits de la grande pyramide

On trouve, dans la pyramide de Khéops de nombreuses relations mathématiques intéressantes entre divers éléments. Sans entrer dans les détails on a, pour les surfaces par exemple :

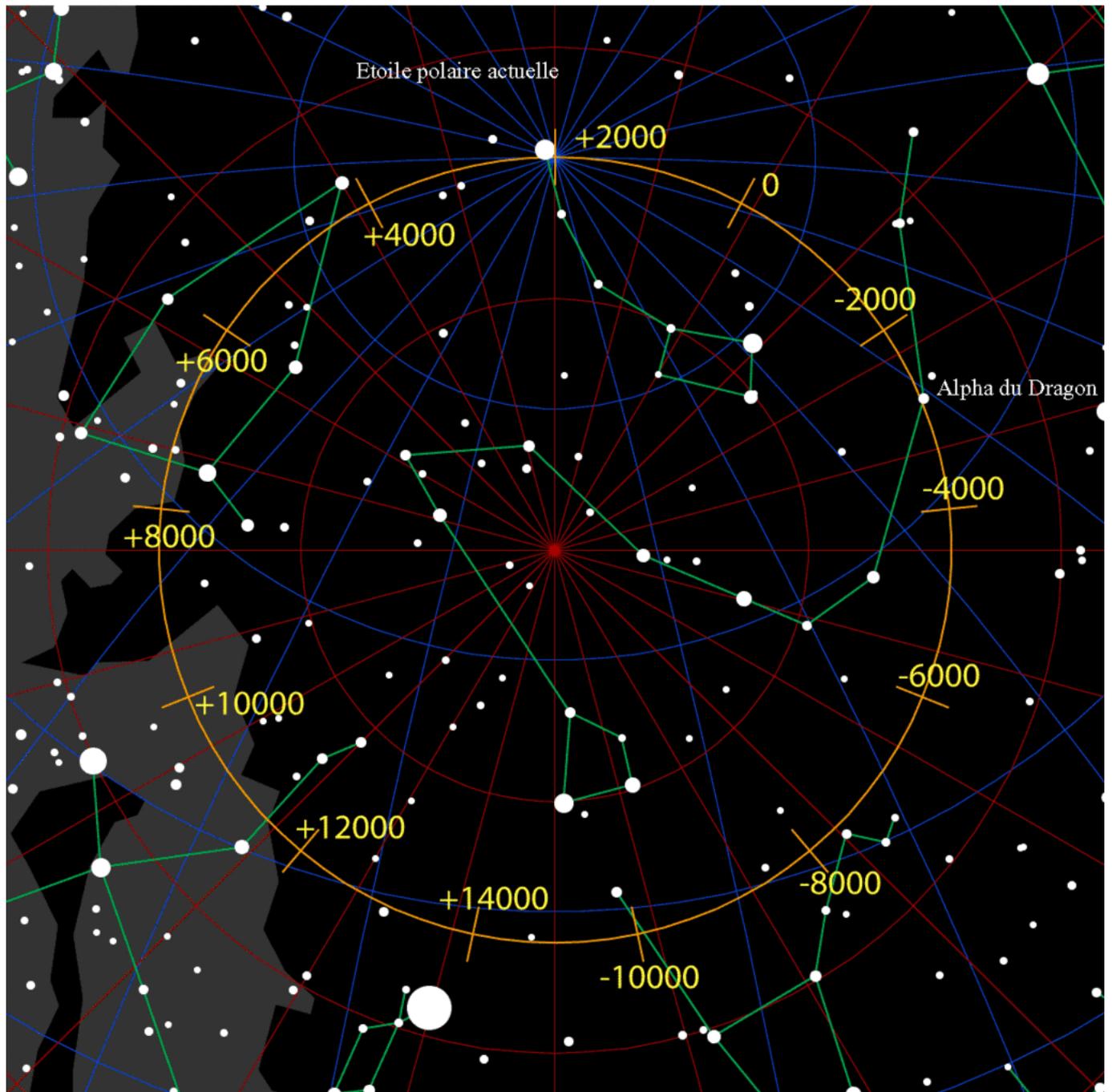
- 1 : l'aire du niveau de la chambre du roi est égale, à 0,01 % près, à la moitié de l'aire de la base de la pyramide.
- 2 : Le périmètre de la base de la pyramide est égal, à 0,02 % près, à la circonférence du cercle dont le rayon est la hauteur de la pyramide.
- 3 : L'aire de chacune des faces de la pyramide est égale, à 0,001 % près, à la hauteur de la pyramide élevée au carré.

Observations mathématiques et astronomie

L'orientation de la pyramide suivant les quatre points cardinaux

Il s'agit de la propriété la plus remarquable d'un point de vue technique, et tous s'accordent sur le fait qu'elle fut bien l'intention des constructeurs. C'est l'égyptologue [Petrie](#) qui, au XIX^e siècle, est le premier à avoir attiré l'attention sur l'extraordinaire précision obtenue par les anciens Égyptiens. Les quatre faces mesurent à leur base : 230,454 m au sud, 230,253 m au nord, 230,357 m à l'ouest et 230,394 m à l'est. L'erreur obtenue pour un carré parfait est de seulement 20 cm. La pyramide est orientée suivant les quatre points cardinaux avec une erreur moyenne de 3'. L'erreur moyenne sur les angles droits de la base est également de 3'. La base de la pyramide a été nivelée avec une erreur de quelques centimètres.

La pyramide et l'étoile polaire



La précession des équinoxes (position de l'étoile polaire vers [-2650](#))

La précession des équinoxes est un changement de direction de l'axe de rotation de la terre. Cet axe de rotation pointe actuellement vers l'étoile polaire, l'étoile la plus brillante de la constellation de la petite ourse. Cette précession a pour effet de provoquer un mouvement apparent des étoiles de la voûte céleste, et par conséquent de l'étoile polaire. Si l'on remonte à l'époque de la construction de la grande pyramide (vers -2650), Alpha du Dragon (aussi appelée Thuban) de la constellation du Dragon était au plus proche de l'axe de rotation de la terre allant même ne s'en éloigner que de $0,5^\circ$ vers -2800. De nombreux auteurs affirment que, le conduit nord de la chambre du roi ou la descenderie, pointaient vers l'étoile polaire de l'époque, Alpha du Dragon. Il y a un moyen très simple de déterminer l'angle d'inclinaison d'une galerie destinée à viser l'étoile polaire. Il faut que cet angle soit égal à la latitude du lieu où se trouve cette galerie, soit ici la latitude de la pyramide de Khéops qui est de $29^\circ 58' 44''$. Or, d'une part l'angle de la descenderie est de $26^\circ 26' 46''$, et d'autre part l'angle du conduit de ventilation nord de la chambre funéraire est de $32^\circ 30'$. En conclusion ni les conduits, ni la descenderie ne pointait (ou ne pointe) le pôle céleste. Aucun d'entre eux ne pointant l'étoile Alpha du Dragon.

La pyramide et l'étoile Alnitak de la constellation d'Orion

Il y eut de nombreuses théories visant à faire de la pyramide un observatoire astronomique. Les couloirs de ventilation côté sud auraient pointés pour l'un (celui de la chambre de la reine) vers l'étoile Sirius, et pour l'autre (celui de la chambre du roi) vers l'étoile Alnitak. Or le couloir de ventilation sud de la chambre du roi est incliné suivant un angle de 45° par rapport à l'horizontal. Il pointe donc un point du ciel dont l'altitude est égale à 45° alors que l'altitude de l'étoile Alnitak, à cette époque était de $44^\circ 23'$ à son zénith. Un écart de moins de 1° qui ne permettait pas cependant d'avoir une visée directe de l'étoile.



Alnitak (Zeta, à gauche de la ceinture d'Orion) - Sirius en bas à gauche

La pyramide et l'étoile Sirius de la constellation du Grand Chien

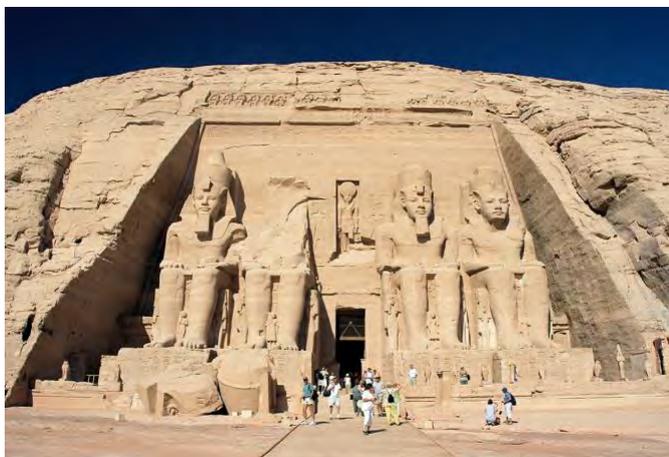
Une autre théorie affirme que le conduit de ventilation sud de la chambre de la reine pointait l'étoile Sirius qui, à l'époque avait une altitude à sa culmination de $37^\circ 10'$. Or ce conduit, incliné de $38^\circ 28'$, pointe un endroit du ciel dont l'altitude est égale à cette valeur angulaire, une position différente de Sirius de plus d'un degré. Toutes les étoiles du ciel (hormis l'étoile polaire) ont un mouvement apparent dû à la rotation de la terre sur elle-même, rotation complète effectuée en 24 heures. Ce mouvement implique que, si une étoile (Sirius ou Alnitak) était effectivement visée, alors le but n'était atteint que durant quelques dizaines de secondes, les étoiles étant animées de ce mouvement apparent qui semble les faire parcourir le ciel nocturne. De plus, les deux étoiles n'atteignent pas leur zénith en même temps, Sirius étant d'abord dans l'axe du

couloir sud de la chambre de la reine, puis c'est au tour d'Alnitak d'être dans l'axe du conduit sud de la chambre du roi. Enfin, il faut noter dans le cas où ce fut l'intention des constructeurs de viser ces étoiles, le fait étrange que les conduits de la chambre de la reine n'étaient pas rectilignes mais accusent au contraire un changement d'axe et de surcroît ils étaient bouchés au niveau de la chambre et s'arrêtent à quelques mètres de la surface du monument rendant toute observation de ce fait impossible. De plus dans l'hypothèse d'un changement de plan dans la construction, les rôles différents attribués aux conduits de la chambre du roi et de la chambre de la reine cadrent mal avec un projet calculé sur les astres.

Critique de ces théories

En 1988, dans « Le Pendule de Foucault », puis dans un ouvrage de 1990 intitulé « Les Limites de l'Interprétation », l'écrivain Umberto Eco tourne en dérision l'interprétation à outrance des faits avérés ou légendaires de l'histoire. Il tire des dimensions d'un kiosque à journaux pris au hasard dans sa rue, le même genre d'informations et d'analyses que celles faites parfois sur la pyramide de Khéops. Il montre ainsi que lorsqu'on s'applique à essayer de trouver des nombres remarquables comme Pi, ou la distance de la Terre à la Lune, on peut les trouver facilement, même dans un objet du quotidien.

c) Les temples du Nouvel Empire (exemple : Abou Simbel)



Façade du temple principal d'Abou Simbel



Illumination du sanctuaire du grand temple d'Abou Simbel

De manière générale, si la topographie du terrain d'implantation le permettait, les édifices religieux du Nouvel Empire étaient orientés vers le Nil. Mais il arrivait quelquefois que le culte ait des exigences supplémentaires en introduisant des événements célestes dans le langage architectural.

Ramsès II (-1304 à -1213), pharaon de la XIX^e dynastie, eut un règne très long. Il fut un grand guerrier mais surtout un énorme bâtisseur. Partout en Egypte des temples, des statues furent érigés sous son règne. Il fit notamment, assez tôt, construire les temples d'Abou Simbel, dont la partie sud représente l'exemple le plus célèbre d'une mise en scène « astronomico-religieuse ». Afin d'affirmer sa directe apparition en tant que soleil, Ramsès II fit édifier un speos flanqué en façade de quatre colosses de vingt mètres de hauteur, orienté vers l'est, afin que deux fois par an les rayons régénérateurs de l'astre diurne illuminent le saints-des-saints, c'est-à-dire le sanctuaire du temple (qu'on appelle le « Naos »). Au lever du soleil, ses rayons éclairent le fond du sanctuaire et, à l'époque du pharaon, trois statues sur les quatre les 21 février et 21 octobre, qui sont actuellement éclairées les 23 février et 23 octobre; un décalage d'une journée du lever du soleil fait un décalage de 40 cm de la partie éclairée dans le sanctuaire. Les statues représentent Ptah, Rê-Horakhty, Ramsès II et Amon-Rê. Seul Ptah, dieu chthonien, reste dans l'obscurité lors de l'événement. Cependant, la lecture ne s'arrête pas là puisqu'au cours de deux périodes de l'année, ce sont les statues osiriaques de la « salle-cour » qui reçoivent une à une les rayons du soleil levant. Ces périodes sont celles du 10 janvier au 30 mars et du 10 septembre au 30 novembre. Les architectes égyptiens avaient donc savamment étudié le plan du temple rupestre afin de fixer dans la roche ces instants primordiaux à un culte dont la signification précise est oubliée.

L'astronomie dans les textes religieux

L'Ancien Empire et les Textes des pyramides (qu'on appelle « le livre des morts » et qui figurent dans tous les tombeaux égyptiens [de pharaons ou de notables]).

Pour la première fois, sous le règne d'Ounas, les Égyptiens inscrivent des textes religieux sur les parois de l'antichambre et de la chambre funéraire, restant ainsi à la disposition du ka du roi. Ces textes consistent en formules d'offrandes, formules magiques et invocations permettant au souverain défunt d'accéder à la renaissance. Certaines formules laissent entrevoir que les égyptiens avaient déjà à cette époque, analysé la configuration du ciel étoilé, imaginé et structuré des groupements d'étoiles qu'ils associèrent à la mythologie. Ainsi, Dans les textes de la pyramide d'Ounas, des étoiles horaires (les décans du Moyen Empire ?) sont déjà mentionnées, ainsi que quelques grandes constellations comme la Grande ourse et Orion.

Les étoiles circumpolaires et la Grande Ourse

- « Les Deux-Énéades se sont purifiées pour lui dans la Grande Ourse (*mshtjw*), impérissable (*jhm-sk*) (formule 302) ».
- « Tu pourras monter car Geb l'aura remis comme pauvre dans la localité lui appartenant. Qu'il recule et qu'il parte afin que tu puisses te purifier dans l'eau des étoiles ! Tu descendras sur une corde d'airain sur les épaules d'Horus en son nom de celui qui est dans la barque de Sokar. Les henmemet pousseront des cris pour toi, car les Impérissables (*jhmw-sk*) t'auront soulevé (formule 214) ».
- « que cet Ounas guide les indestructibles (*jhmw-sk*), qu'il navigue vers la Campagne des Joncs ! (formule 269) »
- « Qu'Ounas monte sur le giron d'Isis, que cet Ounas grimpe sur le giron de Nephtys. Le père d'Ounas, Atoum, prendra la main d'Ounas et il confiera Ounas à ces dieux sages et intelligents, les Indestructibles (*jhmw-sk*) (formule 269) ».

Orion et Sirius

Orion (ou plus précisément le baudrier d'Orion) était connue des égyptiens sous le nom *szh* et figurait l'Osiris visible, le pendant de l'Osiris invisible figuré par la Grande ourse (*mshtjw*). L'Osiris visible du baudrier d'Orion était entouré par ses quatre enfants dits « les enfants d'Horus l'ancien » (la version archaïque d'Osiris). Ceux-ci étaient Amset, Hâpi, Douamoutef et Kébehsénouf et formaient l'astérisme rectangulaire ceignant le baudrier d'Orion. Selon Bernard Mathieu, Qébehsénouf serait ainsi l'étoile Rigel, Hâpy l'étoile Bételgeuse, Douamoutef l'étoile Bellatrix et Imséti l'étoile Saiph.

- « As-tu besoin de monter au ciel que tu montes, tes jambes sont Amset et Kébehsénouf, as-tu besoin de descendre vers le ciel d'en bas que tu descends, tes membres sont les fils et fille (*Hâpi et Douamoutef*) d'Atoum, Impérissable (formule 215) ».
- « Orion (*szh*) a été avalée par la Douat, pure et vivante dans l'horizon. Sirius (*spdt*) a été avalée par la Douat, pure et vivante dans l'horizon. Ounas que voici a été avalé par la Douat, pur et vivant dans l'horizon (formule 216) ».
- « Puissiez-vous parcourir la voûte céleste ! Puissiez-vous être unis dans l'obscurité ! Puissiez-vous paraître à l'horizon à l'endroit où cela vous est profitable ! (formule 217) »

Les étoiles horaires

- « Ô responsable des étoiles horaires (*wnwt*) qui se trouvent devant Rê, préparez le chemin pour Ounas afin qu'Ounas puisse passer dans le chemin de ronde de ceux aux visages agressifs (formule 251) ».

La voie lactée

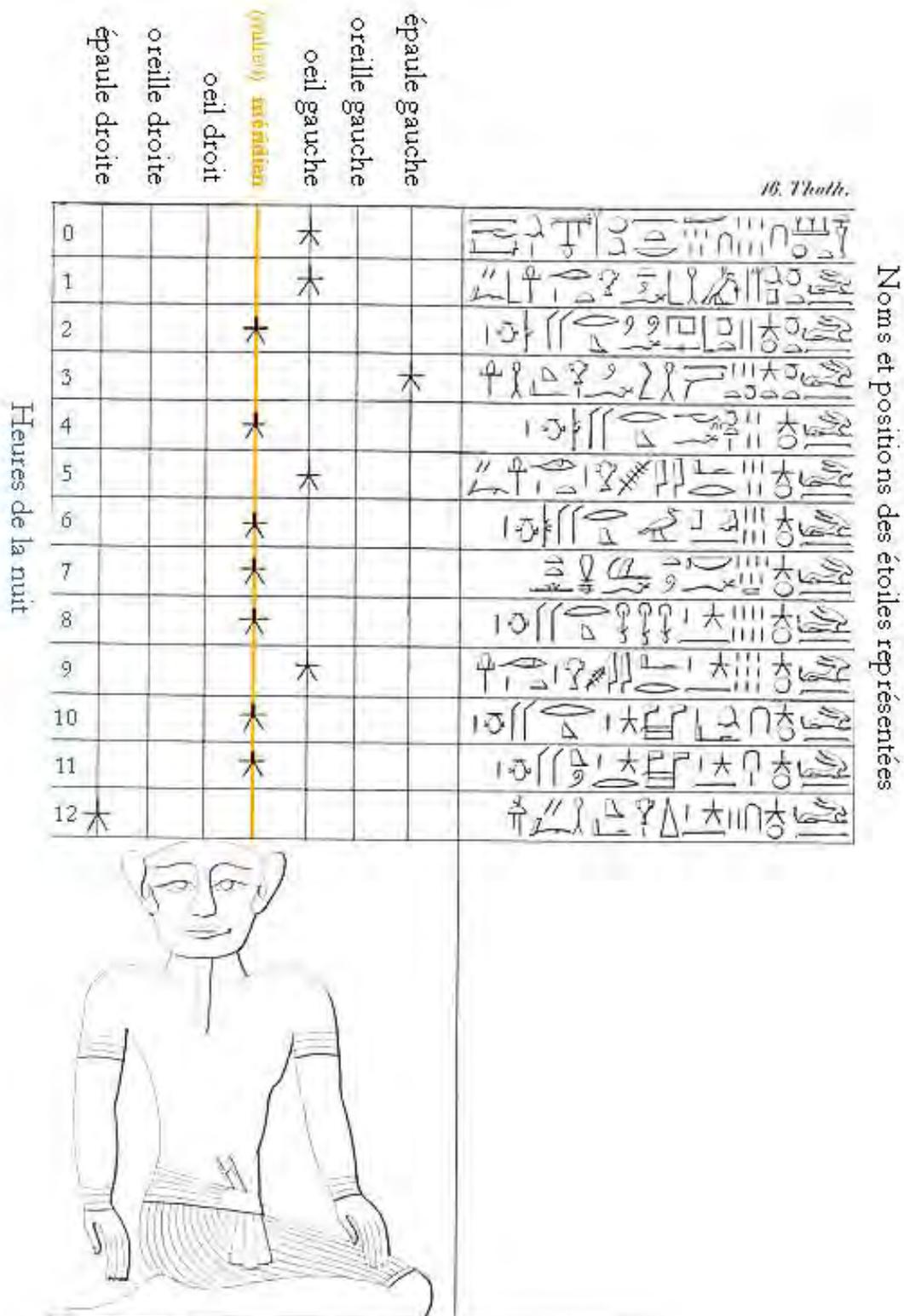
- « Il s'est défendu dans la chapelle blanche des grands dans la Mesqet (*msqt*) des étoiles (formule 262) ».

Horloges stellaires de la première période intermédiaire et du Nouvel Empire



Sarcophage de Itib (première période intermédiaire)

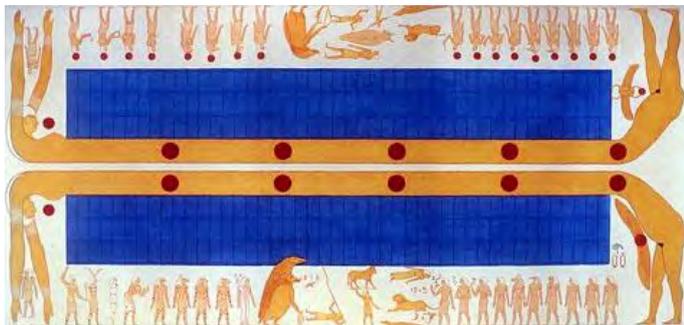
Une horloge stellaire égyptienne est une représentation structurée et complexe de données astronomiques, emprunte de mythologie et élaborée par les prêtres-astronomes de l'Égypte antique. Il existe différents types d'horloges stellaires telles que les horloges décanales ou les horloges stellaires ramessides. Les premières horloges stellaires connues datent de la première période intermédiaire et figurent sur une vingtaine de sarcophages de hauts dignitaires égyptiens. La découverte de ces horloges dans des monuments à vocation strictement funéraire ne permet pas de conclure à une destination autre qu'à l'accomplissement de rites religieux. Une utilisation plus pratique voire scientifique, si tant est que ce dernier mot ait un sens en Égypte antique, serait en l'état de nos connaissances, conjecturale. Les plus anciennes horloges stellaires décrivent une division de la nuit en douze heures, heures de durées variables, à l'aide de trente-six décans. Ces décans sont définis à l'aide du calendrier civil de 365 jours et représentent chacun une portion du ciel (une étoile ou un groupe d'étoiles) pour chaque heure de la nuit. Les horloges stellaires détaillent les levers héliaques des décans pour chaque heure de la nuit et pour chaque décennie de l'année, ainsi que les fêtes associées et constituent en quelque sorte une sorte d'éphémérides mais où les planètes ne prennent aucune place.



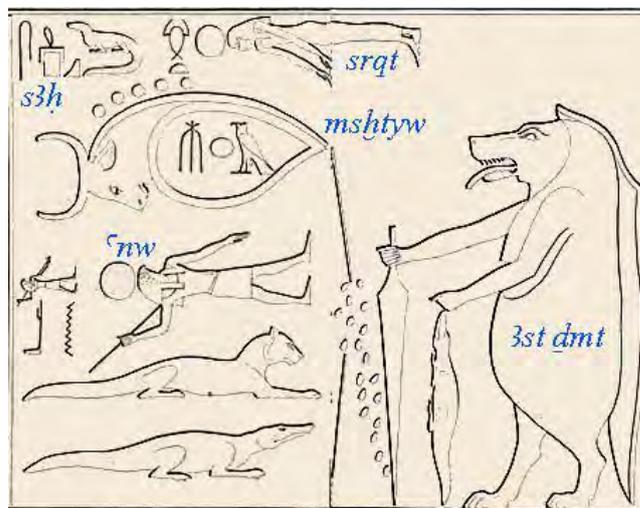
Fonctionnement d'une table ramesside (tombeau de Ramsès VI)

Les horloges de type ramesside sont postérieures de quelque 500 ans et différentes de celles évoquées ci-dessus. Toujours basées sur l'observation des décans, elles indiquent leur culmination ou leur transit en chaque heure de la nuit, à compter de la première heure. Une clepsydre était donc nécessaire pour l'élaboration mais également pour la lecture. Les horloges stellaires ramessides comptaient vingt-quatre tables pour une année entière et, à l'exception de Sirius, les décans observés étaient différents de ceux d'une horloge de la première période intermédiaire.

Plafonds astronomiques du Nouvel Empire



Plafond astronomique de la tombe de Ramsès VII



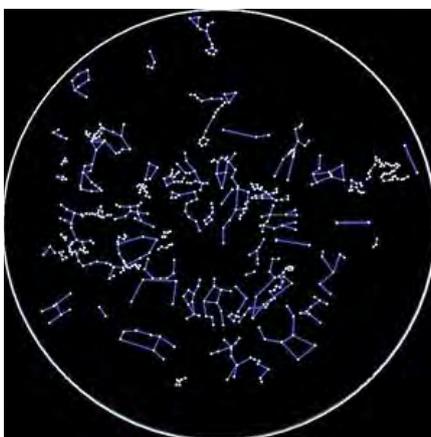
Constellations septentrionales représentées dans le Ramesséum

L'astronomie à la Basse époque

Le zodiaque de Dendérah semble concentrer à lui seul, tout le savoir de l'astronomie que les anciens Égyptiens avaient répertorié depuis Ounas. C'est un planisphère représentant le ciel étoilé en projection plane, avec les douze constellations de la bande zodiacale, les constellations formant les 36 décans et les planètes. Ces décans sont des groupes d'étoiles de premier ordre dans le ciel nocturne. Ils sont utilisés dans le calendrier égyptien, fondé sur les cycles lunaires d'environ trente jours et la récurrence annuelle du lever héliaque de l'étoile Sothis (Sirius). Cette représentation d'un zodiaque circulaire est unique dans l'Égypte antique. Un autre zodiaque rectangulaire orne le plafond du pronaos du temple d'Hathor mais beaucoup moins élaboré que celui-ci, car celui que l'on peut voir dans la salle hypostyle n'est en réalité qu'une procession de chacune des Constellations les unes derrière les autres. Alors que sur le zodiaque circulaire, les distances entre les constellations et leur emplacement dans le ciel est respecté comme, actuellement, on peut l'observer sur un planisphère astronomique.



Photo du plafond de la Salle hypostyle restauré en 2013



Zodiaque de Denderah avec les 48 constellations de Claude Ptolémée clairement identifiées



Représentation fidèle en couleurs du Zodiaque de Denderah

Ce qu'il y a de très particulier avec ce zodiaque dit d'Osiris, car il fut trouvé dans une chapelle sur le toit du Temple, dont les murs évoquent ce dieu, c'est que les deux hémisphères sont représentés sur le même plan. Cette superposition donne l'impression d'un remplissage aléatoire d'un cercle, mais il suffit d'ôter les constellations de l'hémisphère nord, pour comprendre que pour les anciens Égyptiens, existe qu'un seul ciel, ce qui somme toute est assez logique, puisque la Terre est ronde et quand la parcourant le ciel semble faire défiler ces constellations. Il semble que la grande « terrasse » servait d'observatoire aux prêtres astronomes de ce temple dont les plans de construction et même une partie de sa construction remonte au pharaon Khéops.

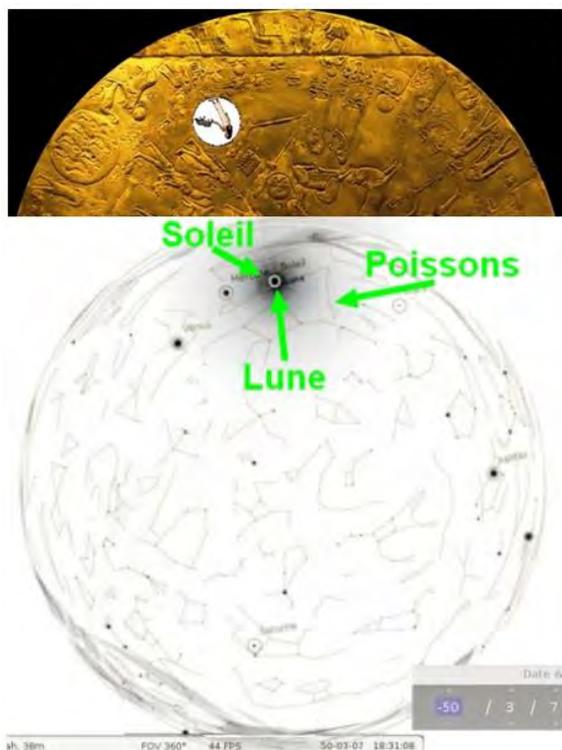
La voûte céleste est représentée par un disque soutenu par quatre piliers du ciel sous forme de femmes qui symboliseraient les quatre points inter-cardinaux, entre lesquelles sont intercalées quatre paires de génies à tête de faucon qui eux symboliseraient chaque point cardinal. Ces directions cardinales liées aux « oiseaux » du zodiaque sont confirmées par la fête de Min du Ramesséum qui se déroulait suivant un certain nombre d'étapes rituelles dont le lâché de quatre oiseaux (oies ou faucons), volant vers les quatre points cardinaux.

Au Nouvel Empire, ils sont associés aux décans dans les plafonds astronomiques.

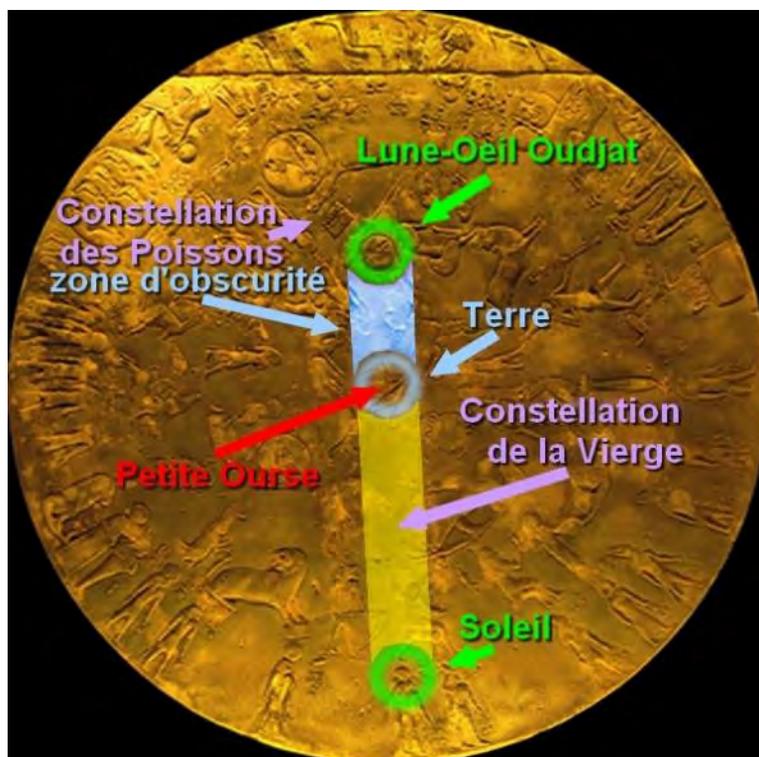
Sur la première circonférence, trente-six génies semblent symboliser les 360 jours de l'année égyptienne du calendrier nilotique à différencier du calendrier civil égyptien, qui lui comptait 365 jours, mais cette dénomination de « génies » n'est due qu'au manque d'étude approfondie de ce zodiaque égyptien, en effet, en y regardant de plus près, on observera la représentation de divinités, telles que Sobek, Anubis, Horus adulte et enfant et d'autres aussi célèbres, ces divinités sont bien majeures en égyptologie, tandis que le terme « génie » s'adresse plutôt à des divinités mineures, telles que Bès qui lui ne figure pas sur ce zodiaque. Sur le cercle intérieur, on trouve l'écliptique, lequel reprend les signes du zodiaque dont la représentation est proche de leur désignation actuelle comme le Bélier, le Taureau, les Gémeaux, le Cancer, le Lion, la Vierge, la Balance, le Scorpion, le Capricorne et les Poissons, par contre le Sagittaire et le Verseau sont représentés par une iconographie plus *égyptienne* mais n'indique pas le style ptolémaïque : le Verseau est représenté comme le dieu de l'inondation Hâpy, tenant deux vases d'où jaillit de l'eau. Les autres personnages préfigurent les constellations, dont on a pu identifier avec certitude 34 en plus des 12 Constellations de l'écliptique, tels que Orion, Draco, Lupus, Aquila, Cassiopea, Equuleus, Ursa Major, Ursa Minor..., leur iconographies sont rattachées à la mythologie et à la culture égyptiennes mais leurs formes astronomiques évoquent bien nos actuelles constellations.

Éclipses

Selon l'indication du musée du Louvre : « deux éclipses ont été représentées à l'endroit précis où elles se sont produites . L'éclipse solaire du 7 mars -51 est figurée sous l'aspect de la déesse Isis retenant un animal par la queue, c'est-à-dire empêchant la lune de cacher le soleil.



Éclipse solaire du 7 mars 51 avant notre ère (-50 en calendrier astronomique) indiqué sur le zodiaque de Dendérah



Éclipse lunaire du 25 septembre 52 avant notre ère (-51 en calendrier astronomique) indiquée sur le zodiaque de Dendérah

L'éclipse lunaire du 25 septembre -52 est un œil-oudjat (qui signifie *être intact*), car une éclipse lunaire a toujours lieu à la pleine lune ». Les éclipses solaire et lunaire clairement identifiées sur le zodiaque circulaire du temple d'Hathor indiquent une maîtrise incontestable de l'astronomie par les anciens Égyptiens : en effet c'est seulement à partir de Claude Ptolémée que l'on a vérifié le phénomène d'une éclipse après que celle-ci avait eu lieu. Car pour prédire une éclipse, il aurait fallu effectuer de fastidieux calculs, le plus souvent en vain, lors de chaque nouvelle lune. La première prédiction d'éclipse solaire établie par l'Occident, de manière certaine, dont on possède le calcul, est celle du 16 juillet 1330, réalisée par Nicéphore Grégoras à Byzance. La fameuse prédiction d'éclipse solaire de Thalès relatée par Hérodote, est probablement exagérée. Cette éclipse s'est bien produite le 28 mai -585 et était visible dans cette partie du monde mais une prédiction d'éclipse suppose des outils théoriques et mathématiques très avancés, qu'on estime n'avoir été élaborés qu'au II^e siècle avant notre ère par Hipparque grâce à sa théorie de l'épicycle. Mais une fois ces outils élaborés, il faut encore dresser des tables très précises. On ne sait pas avec certitude quand les premières tables permettant des calculs d'éclipses ont vu le jour mais elles sont antérieures à Ptolémée, qui les a perfectionnées, et elles n'existent pas en Grèce avant Hipparque. Les deux éclipses du Zodiaque de Denderah ne sont donc pas le fruit du hasard, la prévision astronomique de celles-ci s'avère juste, ce qui indique que les anciens Égyptiens maîtrisaient l'astronomie bien avant Hipparque, du fait des calculs et des outils ainsi que du temps d'étude nécessaire à de telles prévisions.

Instruments astronomiques des anciens égyptiens

Les instruments de l'astronome égyptien (horloge et palme) sont un fil à plomb et un instrument d'observation. Ils ont été identifiés avec deux objets du musée de Berlin, un manche court à partir de laquelle un fil à plomb a été suspendu, et une branche de palmier avec une fente. Cette dernière était tenue à proximité de l'œil, le fil à plomb dans l'autre main, peut-être à bout de bras. On n'a pas retrouvé d'ancêtres du télescope à proprement parler, datant de l'Égypte Ancienne, mais nous savons que les anciens Égyptiens faisaient fondre du sable et du natron dans des fours appropriés afin de produire eux-mêmes du verre. Les fours permettent d'obtenir de plus hautes températures, la matière est mieux affinée. La technique du verre formé sur noyau (technique dite de « l'enduction sur noyau », encore appelée « alabastron » : matière vitreuse déposée dans un noyau d'argile et de sable dont elle épouse la forme; après séchage, le noyau se rétracte et peut être ôté facilement) apparaît en Égypte vers la XVIII^e dynastie. C'est certainement en voulant vérifier la pureté du verre en le regardant au soleil que les anciens Égyptiens ont dû constater l'effet loupe qu'offre ce matériau.



La lentille Nimrud Assyrie - diam 38 mm - vers 750 av. J.-C. - (British museum)

L'invention de la loupe se perd dans la nuit des temps : par exemple le musée archéologique d'Héraklion, en Grèce, présente dans une vitrine d'objets du XV^e siècle av. J.-C. quelques « cailloux » arrondis et soigneusement polis de verre, bien transparents, et à travers lesquels on voit parfaitement la trame très grossière de la toile sur laquelle ces « cailloux » sont posés. L'émail apparaît vers 1 500 av. J.-C. C'est une substance vitreuse qui est constituée d'un produit incolore, le fondant, que l'on teint dans la masse en ajoutant certains oxydes métalliques. Les verriers en Égypte antique appliquent des émaux de couleur sur des poteries, toujours pour imiter l'incrustation de pierres précieuses. L'art de la fabrication du verre translucide est très certainement issu de l'art de la céramique.

La technique du polissage remonte au moins au I^{er} millénaire av. J.-C., voire au III^e, de concert avec la découverte du verre. Les premières lentilles optiques furent fabriquées sous l'empire assyrien et sont antérieures à -700 : il s'agissait de cristaux polis. La plupart du temps de quartz. Mais des lentilles similaires à celles provenant d'Assyrie furent fabriquées par les anciens Égyptiens. Les premiers travaux d'optique pratique visent la mise au point de lentilles et remontent aux anciens Égyptiens et Babyloniens. Sous la dynastie Ptolémaïque, Alexandrie devient le centre de la verrerie de l'empire, fabriquant toutes sortes d'objets en verre.

2. En Mésopotamie

Les prédictions astrologiques et les signes célestes formaient la préoccupation essentielle de l'astronomie en Mésopotamie. Les Babyloniens et les Assyriens archivaient et conservaient précieusement les comptes rendus de leurs observations astronomiques remontant jusqu'au III^e millénaire av. J.-C. Les Sumériens bâtirent leur calendrier sur la structure des constellations. Des milliers de tablettes d'argile rédigées en cunéiforme contiennent des textes astronomiques, que l'on attribue aux bibliothèques d'Uruk et de Ninive. Tôt au cours du III^e millénaire av. J.-C., on qualifia Vénus d'*étoile d'Inanna*. D'antiques sceaux cylindriques et des poèmes dédiés à la planète Vénus en tant qu'incarnation d'Inanna témoignent de l'antiquité des connaissances astronomiques de ce peuple : *Inanna, c'est en tant que Vénus que les nations étrangères te voient luire. Ô maîtresse des cieux, je voudrais te dédier mon chant.*

Fort de leurs copieuses chroniques astronomiques, les astronomes babyloniens formèrent les premières séries mathématiques, qui leur servaient à calculer les positions des astres et, par là même, à prédire les prochains phénomènes célestes. Dès 1000 av. J.-C., ils étaient en mesure de tirer des complexes chroniques de conjonction astrale les périodes individuelles de certains astres, et donc de prédire les temps de passage. Nabu-rimanni est le premier astronome chaldéen dont le nom nous soit parvenu. Les connaissances astronomiques des Hébreux leur venaient de l'astronomie babylonienne : aussi retrouve-t-on dans la Bible l'écho d'énoncés chaldéens sur la position de la Terre dans l'Univers, sur la nature des étoiles et des planètes.

L'**astronomie babylonienne** désigne les théories et les méthodes astronomiques développées dans l'ancienne Mésopotamie, le « pays entre les deux rivières » Tigre et Euphrate (dans l'Irak actuel), et où s'épanouirent les royaumes de Sumer, d'Akkad, de Babylonie et de Chaldée. L'astronomie babylonienne est à la source des traditions ultérieures de l'astronomie grecque et hellénistique, de l'astronomie indienne classique, de celles des Sassanides, des Byzantins et des Syriens, de l'astronomie médiévale des Musulmans et des Européens. Les sources classiques grecques et latines désignent fréquemment les astronomes de Mésopotamie du nom de Chaldéens : il s'agissait en réalité de prêtres-scribes spécialisés dans l'astrologie et d'autres formes de divination.

Entre le VIII^e siècle av. J.-C. et le VII^e siècle av. J.-C., les Chaldéens développent une approche empirique de l'astronomie tout en élaborant une cosmologie, nature idéale de l'univers. Une discipline divinatoire, l'**astrologie**, liée aux positions des planètes, s'appuie sur une logique interne, contribution décisive à l'astronomie et à la philosophie des sciences : certains chercheurs y voient une **première révolution scientifique**. Cette démarche nouvelle en astronomie sera adoptée et intégrée par l'astronomie classique et hellénistique.

a) L'astronomie paléo-babylonienne

L'astronomie paléo-babylonienne recouvre l'astronomie pratiquée antérieurement à l'avènement de l'empire chaldéen.

Les origines de l'astronomie occidentale se trouvent en Mésopotamie. Une forme d'écriture connue sous le nom de cunéiforme apparaît chez les Sumériens entre 3500 av. J.-C. et 3000 av. J.-C. Quoique les Sumériens ne pratiquent qu'une astronomie rudimentaire, ils auront une influence considérable sur la naissance de l'astronomie sophistiquée des Babyloniens. La théologie astrale, qui considère les planètes comme des dieux importants de la mythologie mésopotamienne et de la religion, naît avec les Sumériens. Ce peuple utilise aussi une numération de position sexagésimale (de base 60), qui simplifie la notation de nombres très grands ou très petits. Les Babyloniens sont les premiers à avoir consigné par écrit le caractère périodique de certains phénomènes célestes, et à avoir appliqué le calcul écrit pour formuler leurs prévisions : des tablettes de la période paléo-babylonienne témoignent de l'application des mathématiques pour déterminer la variation de la durée du jour au long de l'année solaire. On dispose de siècles d'observation des phénomènes célestes sur les tablettes cunéiformes dénommées **Enûma Anu Enlil**; le plus vieux texte astronomique reconnaissable que nous possédions est la « tablette 63 » de cette collection, appelée *tablette de Vénus d'Amisaduga*, qui donne la liste des levers et couchers visibles de la planète Vénus sur un cycle de 21 ans. Il s'agit du premier témoignage de l'identification d'un mouvement astral périodique. La tablette Mul Apin offre un catalogue d'étoiles et de constellations ainsi que des méthodes pour trouver les levers héliaques et le coucher des planètes, et une correspondance sur la durée du jour mesurée à la clepsydre, au gnomon, aux ombres portées, et les intercalations. La tablette GU énumère les étoiles selon des chaînes s'étalant le long des cercles de déclinaison, donne leur ascension droite et leur temps de passage, et nomme aussi les étoiles du zénith, avec leurs écarts d'ascension droite. On connaît enfin des douzaines de tablettes d'argile écrites en cunéiforme rapportant des observations d'éclipses, la plupart de Babylone.

b) L'astronomie chaldéenne

L'astronomie chaldéenne recouvre non seulement l'astronomie pratiquée sous la dynastie chaldéenne, mais aussi sous les Séleucides et les rois Parthes. Dès le règne de Nabonassar (747-733 av. J. Chr.), fondateur de l'empire néo-babylonien, on observe une amélioration significative des observations astronomiques, en qualité comme en quantité. L'archivage systématique des phénomènes célestes jugés importants pour les présages amène bientôt la découverte de nouvelles périodicités, telles que le cycle de 18 ans séparant deux éclipses lunaires. L'astronome grec Ptolémée fixera d'ailleurs l'origine de son calendrier au début du règne de Nabonassar, jugeant que les premières observations fiables ne remontent qu'à cette époque. Les derniers développements de l'astronomie chaldéenne prennent place sous l'Empire séleucide (323-60 av. J. Chr.). Au III^e siècle av. J.-C., les astronomes se mettent à utiliser des « échéanciers » pour prédire le mouvement des planètes. Ces textes sont des annales des observations antérieures et servent à détecter des répétitions périodiques de configurations planétaires à signification astrologique particulière. Vers ce temps, ou peu après, les astronomes remplacent ces tables par des formules de calcul pour trouver la date de la prochaine occurrence.

Développement de l'astronomie empirique

La plupart des astronomes chaldéens ne s'intéressaient qu'aux éphémérides, non à la théorie. Les modèles planétaires des peuples de Mésopotamie étaient strictement empiriques et se traitaient par l'arithmétique : contrairement aux modèles hellénistiques postérieurs, ils ne faisaient intervenir aucune considération de géométrie, de cosmologie ou de philosophie spéculative, bien qu'ils se fussent préoccupés de cosmogonie et de la nature idéale de l'univers primitif. Parmi les principales contributions des astronomes chaldéens au cours de cette période, il y a la découverte des cycles d'éclipse et des cycles de Saros, ainsi que plusieurs observations astronomiques très précises. Parmi les astronomes chaldéens adeptes notoires de ce modèle, il y a lieu de citer Naburimannu (VI^e-III^e siècle av. J.-C.), Kidinnu († 330 av. J.-C.), Bérosee (III^e siècle av. J.-C.), et Soudinès (240 av. J.-C.). Ils ont exercé une influence certaine sur l'astronome grec Hipparque, l'astronome grec d'Alexandrie Ptolémée, et bien d'autres astronomes de l'Époque hellénistique.

Un pionnier de l'héliocentrisme

L'astronome chaldéen **Séleucos de Séleucie** (né en 190 av. J. Chr.) a proposé un modèle héliocentrique pour expliquer les phénomènes célestes. Seleucos nous est connu par les écrits de Plutarque. Il était partisan d'un système héliocentrique où la Terre tournant sur elle-même effectuait en outre une révolution autour du Soleil. Selon Plutarque, Seleucos donnait même une démonstration de son système, mais son argumentation nous est inconnue. Il est plus que probable que Seleucos ait suivi l'hypothèse émise par **Aristarque de Samos** plus d'un siècle plus tôt !

Selon Lucio Russo, elle serait reliée au phénomène des marées. Seleucos remarque que les marées sont corrélées au mouvement de la Lune, ce qui est correct, même s'il imagine que l'interaction se fait par les mouvements de l'atmosphère. Il remarque que les marées varient en durée et en intensité selon les différentes mers. D'après Strabon, Seleucos serait le premier à avoir expliqué les marées par l'action mécanique de la Lune, et à avoir relié l'intensité des marées à la position relative de la Lune par rapport au Soleil. Selon van der Waerden, Seleucos aurait justifié sa théorie héliocentrique en calculant les constantes d'un modèle géométrique et en montrant que ce modèle donne des prédictions correctes. Il aurait pu s'appuyer sur les méthodes trigonométriques de cette époque, puisqu'il était contemporain d'Hipparque.

c) Influence sur l'astronomie hellénistique

Si de nombreux écrits des auteurs grecs de la période classique et hellénistique (dont ceux de mathématiciens, d'astronomes, et de géographes) sont parvenus jusqu'à nous, éventuellement par une tradition indirecte, l'œuvre des autres peuples ou civilisations du Proche-Orient ancien, notamment celle des Babyloniens, ont sombré dans l'oubli pendant une longue période. Mais, depuis l'exploration de sites archéologiques clefs au XIX^e siècle, plusieurs écrits en cunéiforme couchés sur des tablettes d'argile ont été mis au jour, dont certains ont trait à l'astronomie. La plupart de ces tablettes astronomiques ont été décrites par Abraham Sachs et publiées par la suite par François Thureau-Dangin dans ses *Textes mathématiques babyloniens*. Depuis la redécouverte de la civilisation babylonienne, il est devenu évident que l'astronomie grecque a beaucoup emprunté aux Chaldéens. Les emprunts les mieux documentés se trouvent chez Hipparque (II^e siècle av. J.-C.) et Claude Ptolémée (II^e siècle).

Une influence précoce

Plusieurs chercheurs s'accordent pour dire que le cycle de Méton a probablement été connu des Grecs par des scribes babyloniens. Méton, un astronome athénien du V^e siècle av. J.-C., proposa un Calendrier luni-solaire fondé sur la quasi-équivalence de 19 années solaires et de 235 mois lunaires, observation déjà connue des Babyloniens. Au IV^e siècle av. J.-C., Eudoxe de Cnide écrivit un livre sur les astres fixes. Les descriptions qu'il donne de plusieurs constellations, particulièrement celles des douze signes du zodiaque, sont étrangement semblables à celles des Babyloniens. Un siècle plus tard, Aristarque de Samos utilise un cycle d'éclipses découvert par les Babyloniens, le Saros, pour déterminer la durée d'une année. Cependant, tout cela n'est que suppositions et on ne connaît pas de lien précis entre ces auteurs.

Les héritiers : Hipparque et Ptolémée

Franz Xaver Kugler, par exemple, a montré la chose suivante : Ptolémée, dans l'Almageste, indique qu'Hipparque a corrigé la durée des phases de la Lune transmises par « des astronomes encore plus anciens » en rapportant les observations des éclipses faites auparavant par « les Chaldéens » aux siennes. Or, Kugler a montré que les périodes que Ptolémée attribue à Hipparque étaient déjà utilisées dans des éphémérides babyloniens, à savoir le recueil nommé « Système B » (parfois attribué à Kidinnu). Apparemment, Hipparque s'est borné à confirmer par ses observations l'exactitude des valeurs de périodes qu'il avait lues dans les écrits des Chaldéens. Il est évident qu'Hipparque (et Ptolémée à sa suite) disposaient d'une liste complète des observations d'éclipses sur plusieurs siècles. Celles-ci avaient très probablement été compilées à partir des « tablettes-journaux », tablettes d'argile contenant toutes les observations significatives effectuées au jour le jour par les Chaldéens. Les exemplaires préservés datent de 652 av. J. Chr. à 130 de notre ère, mais les événements célestes qui y sont consignés remontent très probablement au règne du roi Nabonassar : car Ptolémée fait commencer sa chronologie au premier jour du calendrier égyptien, la première année du règne de Nabonassar, c'est-à-dire le 26 février 747 av. J.C. Il n'a pas dû être facile d'exploiter toute cette masse d'observations, et il n'est pas douteux que les Chaldéens eux-mêmes se

servaient de tables abrégées contenant, par exemple, uniquement les éclipses observées (on a trouvé quelques tablettes portant une liste de toutes les éclipses sur une période correspondant à un « saros »). Ces tables leur permettaient déjà de constater le retour périodique de certains phénomènes. Parmi les périodes utilisées dans le recueil du « Système B » (cf. *Almageste* IV.2), on trouve :

- 223 mois (synodiques) = 239 passages au périgée (mois anomalistique) = 242 passages sur la ligne des nœuds (mois draconitique). Cette période est appelée période de saros : elle est très pratique pour calculer les périodes d'occurrence des éclipses.
- 251 mois (synodiques) = 269 passages au périgée
- 5458 mois (synodiques) = 5923 passages à la ligne des nœuds
- 1 mois synodique = 29:31:50:08:20 jours (dans le système sexagésimal), 29.53059413... jours en numération décimales = 29 jours 12 heures 44 min 3 $\frac{1}{3}$ s)

Les Babyloniens exprimaient toutes les périodes en mois synodiques, probablement parce qu'ils utilisaient un calendrier luni-solaire. Le choix des intervalles entre les phénomènes célestes périodiques survenant en l'espace d'une année donnait différentes valeurs pour la longueur d'une année.

De même, on connaissait plusieurs relations entre les périodes des planètes. Les relations que Ptolémée attribue à Hipparque avaient déjà servi pour des prédictions retrouvées sur des tablettes babyloniennes.

Voici d'autres traces de pratiques babyloniennes dans l'œuvre d'Hipparque :

- Hipparque est le premier auteur grec à avoir divisé le cercle en 360 degrés de 60 minutes.
- il est le premier à avoir utilisé systématiquement la numération sexagésimale.
- il a utilisé le *pechus* (« coudée »), unité d'angle de 2° ou 2 $\frac{1}{2}$ ° d'ouverture.
- il a utilisé la courte période de 248 jours = 9 mois anomalistiques.

Il faut se souvenir que nous devons aux chaldéens l'utilisation du système sexagésimal et que c'est pourquoi, malgré la diffusion généralisée du système décimal, nos heures sont divisées en 60 minutes, elles-mêmes divisées en 60 secondes.

Le problème de la transmission

Toutes ces connaissances passèrent aux Grecs, sans doute peu après la conquête d'Alexandre le Grand (-331). Selon le philosophe Simplicius (début du VI^e siècle), Alexandre avait ordonné la traduction des éphémérides astronomiques chaldéens, et en avait confié la supervision à son biographe Callisthène d'Olynthos, qui les envoya à son oncle Aristote. Si Simplicius ne nous offre qu'un témoignage tardif, son récit n'en est pas moins fiable, car il passa quelque temps en exil à la cour des Sassanides, et a pu avoir accès à des sources documentaires ayant disparu en Occident. Ainsi il est frappant qu'il emploie le titre *tèresis* (en grec, « veille »), étrange pour un livre d'histoire, mais qui constitue une traduction précise du babylonien *massartu* qui signifie « monter la garde » mais également « observer ». Quoi qu'il en soit, c'est vers cette époque que Calippe de Cyzique, un élève d'Aristote, proposa l'emploi d'un cycle de 76 ans, qui améliore le cycle de Méton, d'une durée de 19 ans. Il faisait démarrer la première année de son premier cycle au solstice d'été (28 juin) de l'an 330 av. J.-C. (date julienne prolepse), mais par la suite il semble qu'il ait compté les mois lunaires à partir du mois suivant la victoire d'Alexandre à la bataille de Gaugamèles, à l'automne 331 av. J.-C. Ainsi, Calippe a pu obtenir ses données de sources babyloniennes, et il est donc possible que son calendrier soit antérieur à celui de Kidinnu. On sait par ailleurs que le prêtre babylonien connu sous le nom de Bérose écrivit en grec vers 281 av. J.-C. une histoire (à caractère plutôt mythologique) de la Babylonie, les *Babyloniaca*, dédiées au nouveau monarque Antiochos I^{er}; et l'on dit qu'il fonda par la suite une école d'astrologie sur l'île grecque de Cos. Parmi les autres auteurs qui ont pu transmettre aux Grecs les connaissances babyloniennes en astronomie-astrologie, citons Soudinès qui vivait à la cour du roi Attale I^{er} Sôter à la fin du III^e siècle av. J.-C.

Quoi qu'il en soit, la traduction de ces annales astronomiques exigeait une connaissance profonde de l'écriture cunéiforme, de la langue et des méthodes, de sorte qu'il est vraisemblable qu'on a confié cette tâche à un Chaldéen dont le nom ne nous est pas parvenu. Les Babyloniens, en effet, dataient leurs observations dans leur calendrier luni-solaire, dans lequel la durée des mois et des années n'est pas fixe (29 ou 30 jours pour les mois ; 12 ou 13 mois pour les années). Qui plus est, à cette époque ils n'utilisaient pas encore de calendrier régulier (fondé par exemple sur un cycle, comme le cycle de Méton), mais faisaient démarrer un mois à chaque [nouvelle lune](#). Cette pratique rendait fastidieux le calcul du temps séparant deux événements.

La contribution d'Hipparque a dû consister à convertir ces données en dates du calendrier égyptien, qui est fondé sur une année d'une durée fixe de 365 jours (soit 12 mois de 30 jours et 5 jours supplémentaires) : ainsi le calcul des intervalles de temps est beaucoup plus simple. Ptolémée datait toutes ses observations dans ce calendrier. Il écrit d'ailleurs que « Tout ce qu'il (=Hipparque) a fait, c'est une compilation des observations des planètes ordonnée de façon plus commode ». Plin l'Ancien, traitant de la prédiction des éclipses écrit : « Après eux (=Thalès) les positions des deux astres (=le Soleil et la Lune) pour les 600 années à venir furent annoncées par Hipparque, ... » Cela doit vouloir dire qu'Hipparque a prédit les éclipses pour une période de 600 ans, mais étant donné l'énorme quantité de calculs que cela représente, c'est très peu probable. Plus vraisemblablement, Hipparque aura compilé une liste de toutes les éclipses survenues entre le temps de Nabonassar et le sien.

d) De Babylone à Bagdad

L'astronomie des Sassanides

C'est en Mésopotamie que les Sassanides fixèrent la capitale de leur empire, la cité grecque de Ctesiphon. Perses et Babyloniens s'adonnaient à l'astronomie aussi bien à Ctesiphon qu'auprès de l'Académie de Gundishapur, en Perse. L'essentiel des textes astronomiques de la période sassanide furent rédigés en langue Pèhlevî. Les *Zij al-Shah*, recueil de tables astronomiques compilées en Perse et en Mésopotamie deux siècles durant, est le legs essentiel des savants sassanides; il fut traduit en arabe par la suite.

L'astronomie musulmane

Après la conquête musulmane de la Perse, la Mésopotamie prit le nom arabe d'Irak. Sous le califat abbasside, la capitale de l'empire fut transférée à Bagdad, ville fondée en Irak au VIII^e siècle. Du VIII^e siècle au XIII^e siècle, période fréquemment désignée comme l'« Âge d'or de l'Islam », l'Irak-Mésopotamie demeura le centre de l'activité astronomique : on l'étudiait particulièrement à Bassorah. L'arabe devint la langue des lettrés, et les savants musulmans d'Irak ajoutèrent leurs propres contributions à l'astronomie, jusqu'au sac de Bagdad en 1258. Nous reviendrons ultérieurement sur l'astronomie arabe.

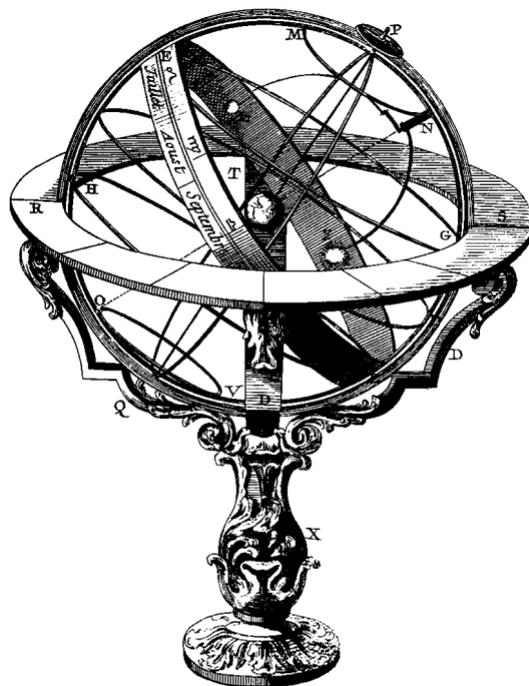
3. La Grèce et Rome – l'ère des philosophes-mathématiciens-astronomes

L'héritage chaldéen

La principale source sur les premières conceptions grecques des phénomènes célestes nous vient des odes poétiques : Homère comme Hésiode évoquent en effet les conditions astronomiques; chez Homère, on ne trouve que de rares allusions aux signes du zodiaque. Les deux auteurs ne font guère montre de connaissances poussées; c'est ainsi qu'ils décrivent la planète Vénus comme deux astres distincts, l'« étoile du matin » (*Phosphoros*, litt. « qui apporte la lumière ») et l'« étoile du soir » (*Hesperos*). Du moins cette méprise, grâce aux connaissances des Babyloniens, était-elle corrigée à l'époque de Platon; par la suite, on attribua à Pythagore l'unification des deux phénomènes. Il n'est pas douteux que les penseurs grecs bénéficièrent des connaissances astronomiques et des méthodes d'observation chaldéennes, très en avance sur les leurs à l'époque homérique. Cette transmission s'opéra de manière progressive, mais les connaissances actuelles sur les débuts de l'astronomie grecque sont lacunaires et l'appréciation de ce qu'ils doivent aux Babyloniens demeure pour cette raison imprécise. Il est certain que la destruction des livres profanes aux premiers siècles de la Chrétienté a fait disparaître un grand nombre d'écrits astronomiques et nous a privés de très nombreux renseignements en la matière. Il est attesté, par exemple, que les Babyloniens disposaient déjà de spécimens rudimentaires de sphères armillaires. Les Grecs utilisèrent à leur tour ces instruments et les perfectionnèrent. Ils reprirent également à leur compte la division du zodiaque en 12 constellations.

La plus grande part de l'héritage fut évidemment transmise peu après les conquêtes d'Alexandre qui, selon Simplicius, aurait confié la traduction des textes babyloniens à Callisthène d'Olynthe. Par exemple, la division du cercle (et donc de l'écliptique et du zodiaque) en 360 degrés semble avoir été adoptée par les Grecs à cette époque. Elle remonte sans doute aux décans des Égyptiens. Mais avant tout, les Grecs de cette époque eurent un accès direct aux observations chaldéennes, consignées avec précision depuis de nombreux siècles. Les Chaldéens en avaient aussi déduit des cycles et des configurations planétaires, qui firent également partie de l'héritage. Les Grecs ignoraient initialement les méthodes mathématiques de leurs

devanciers : ils empruntèrent d'abord une voie différente, car pour les philosophes hellènes, le cosmos est essentiellement **géométrique** et non arithmétique. Le changement de perspective s'opérera progressivement, pour devenir plus marqué, une fois encore, après les conquêtes d'Alexandre. Faut-il y voir une autre influence babylonienne ou est-ce l'effet des évolutions de la philosophie grecque ? La question n'est pas tranchée.



Sphère armillaire. Elles furent utilisées jusqu'au XVII^e siècle

Philosophes et astronomes

Jusqu'au V^e siècle av. J.-C., les présocratiques imaginèrent différents modèles astronomiques pour rendre compte des phénomènes célestes. Ils découvrirent entre autres des méthodes de mesure du temps de plus en plus précises, comme les cadrans solaires, dont le principe leur vint certainement des Babyloniens. Anaximandre, contemporain et disciple de Thalès, est parfois considéré comme le fondateur de l'astronomie en tant qu'auteur de la première théorie astronomique non mythologique. Il fit l'hypothèse du géocentrisme : le premier, il donna à l'Univers la forme d'une sphère, dont la Terre, cylindrique, occupe le centre. Les civilisations antérieures, elles, ne voyaient le ciel que comme un hémisphère surplombant une Terre plate, renvoyant à des mythes l'explication de la disparition et de l'apparition des astres le soir et le matin. Anaximandre n'alla toutefois pas jusqu'à assigner à la Terre une forme sphérique. L'idée de cette sphéricité apparut manifestement au V^e siècle. Elle est parfois attribuée à Pythagore, parfois à Parménide. Il est certain en tout cas que cette idée était largement admise à la fin du V^e siècle ou au début du IV^e, du moins dans les milieux instruits.

Aristote (383 – 322 av J.-C.)

Né en Macédoine, Aristote n'est pas un astronome. Il est plutôt considéré à juste titre comme un philosophe. Avec Platon, dont il fut le disciple à l'Académie, il est l'un des penseurs les plus influents que le monde ait connus. Il est aussi l'un des rares à avoir abordé pratiquement tous les domaines de connaissance de son temps : biologie, physique, métaphysique, logique, poétique, politique, rhétorique et de façon ponctuelle l'économie. Chez Aristote, la philosophie est comprise dans un sens plus large qu'aujourd'hui : elle est à la fois recherche du savoir pour lui-même, interrogation sur le monde et science des sciences.

Mais il a écrit plusieurs textes relatifs à la cosmologie. Dans le *Traité du ciel et Météorologiques*, Aristote démontre que la Terre est sphérique et qu'il est absurde de la présenter comme un disque plat. Il avance comme arguments que les éclipses de Lune montrent des sections courbes et que même un léger déplacement du nord vers le sud entraîne une altération manifeste de la ligne d'horizon. Il divise le globe en cinq zones climatiques correspondant à l'inclinaison des rayons du soleil : deux zones polaires, deux zones tempérées habitables de chaque côté de l'équateur et une zone centrale à l'équateur rendue inhabitable

en raison de la forte chaleur qui y règne. Il estime la circonférence de la Terre à 440 000 stades, soit près du double de la réalité. La conception géocentrique d'Aristote, conjointement avec celle de Ptolémée, dominera la réflexion durant plus d'un millénaire. Aristote distingue deux grandes régions dans le cosmos : le monde *sublunaire*, le nôtre, et le monde *supralunaire*, celui du ciel et des astres, qui sont éternels et n'admettent aucun changement car ils sont constitués d'éther et possèdent une vie véritablement divine et qui se suffit à elle-même. La Terre est nécessairement immobile mais est au centre d'une sphère animée d'un mouvement de rotation continu et uniforme; le reste du monde participe d'une double révolution, l'une propre au « premier Ciel » faisant une révolution diurne d'orient vers l'occident tandis que l'autre fait une révolution inverse d'occident en orient et se décompose en autant de révolutions distinctes qu'il y a de planètes. Ce modèle se complique encore du fait que ce ne sont pas les planètes qui se meuvent, mais les sphères translucides sur l'équateur desquelles elles sont fixées : il fallait trois sphères pour expliquer le mouvement de la lune, mais quatre pour chacune des planètes.

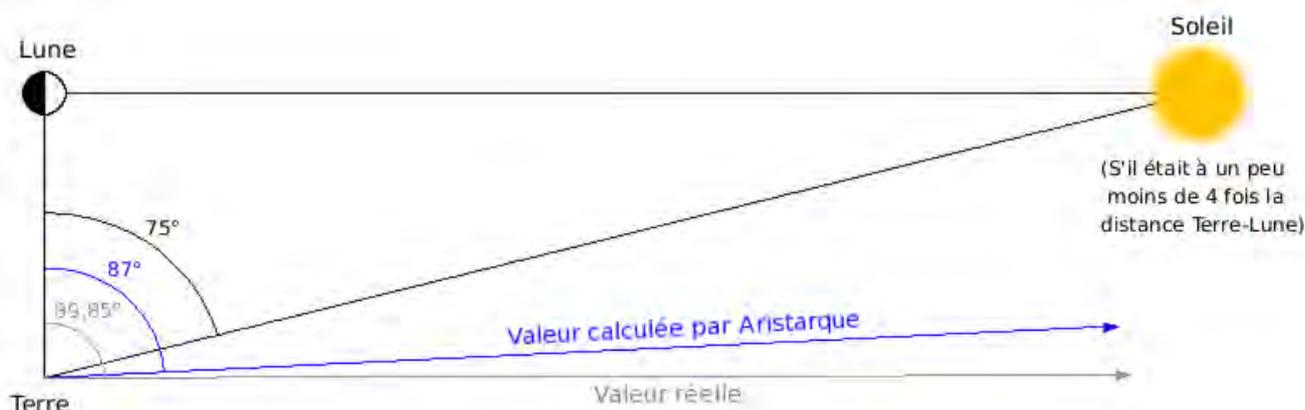
Aristarque de Samos (env. 310 – 230 av. J.-C.)

Né à Samos, en Grèce, c'est un astronome et un mathématicien grec. On sait peu de choses sur la vie d'Aristarque de Samos, sinon qu'il fut l'élève de Straton de Lampsaque au temps où celui-ci enseignait à Alexandrie, en 287 av. J.-C.. De ses écrits ne nous est parvenu que l'ouvrage *Sur les dimensions et des distances du Soleil et de la Lune*. Il est fort probable qu'il ait écrit d'autres ouvrages disparus lors de la destruction de la bibliothèque d'Alexandrie. Sa théorie sur l'héliocentrisme, d'environ 280 av. J.-C., nous est connue grâce au livre *L'Arénaire* dans lequel Archimède écrit : « Vous n'êtes pas sans savoir que par l'Univers, la plupart des Astronomes signifient une sphère ayant son centre au centre de la Terre (...). Toutefois, Aristarque de Samos a publié des écrits sur les hypothèses astronomiques. Les présuppositions qu'on trouve dans ses écrits suggèrent un univers beaucoup plus grand que celui mentionné plus haut. Il commence en fait avec l'hypothèse que les étoiles fixes et le Soleil sont immobiles. Quant à la Terre, elle se déplace autour du Soleil sur la circonférence d'un cercle ayant son centre dans le Soleil ». — Archimède, Préface du traité *L'Arénaire*.

Le mathématicien et l'astronome

Aristarque est le premier homme (à notre connaissance) ayant eu l'intuition du mouvement de la Terre sur elle-même et autour du Soleil. Il est donc le précurseur de l'héliocentrisme ! Ses mesures du diamètre et distance de la Lune et du Soleil sont remarquables davantage pour leur ingéniosité et les méthodes mathématiques utilisées que pour leur exactitude. Aristarque de Samos avait déjà observé que la Lune met à peu près une heure à parcourir une distance égale à son diamètre. Il observe d'autre part que les éclipses de Lune durent deux heures. Il en conclut que la lune reste *entièrement* dans le *cylindre* d'ombre de la Terre durant deux heures et démontre alors que le diamètre de ce cylindre est égal à trois diamètres de Lune. Il en conclut que le diamètre de la Terre est trois fois plus grand que celui de la Lune, il est en réalité 3,7 fois plus grand que celui de la Lune. Il mesure ensuite sous quel angle on voit la Lune de la Terre. Il trouve 2° . Or, selon lui, le diamètre de la Lune vaut $1/3$ du diamètre terrestre. En combinant les deux valeurs, il détermine que l'arc du diamètre lunaire sur l'orbite de la Lune (2°) vaut $1/3$ de diamètre terrestre (DT). Bien que le résultat du calcul d'Aristarque ne soit pas donné par les textes, il est aisé d'en déduire que pour lui l'orbite lunaire mesure 60 diamètres terrestres. Par suite, la distance Terre-Lune mesure approximativement 40 rayons terrestres (60,2 en réalité). Le procédé est ingénieux, mais la méthode et les calculs souffrent de nombreuses imprécisions. D'abord et surtout, le diamètre angulaire de la lune est très surestimé (2° contre $0,5^\circ$). Ensuite, cet angle est observé depuis la surface de la Terre, alors que le rayon de l'orbite part de son centre (l'élimination de cette approximation requiert des calculs trigonométriques) et le diamètre de l'ombre de la Terre sur la Lune est supérieur à son estimation. D'autres approximations ont une influence moindre sur le résultat : la valeur de π est peu précise à l'époque et l'ombre de la Terre est considérée comme cylindrique, alors qu'elle est en fait conique. Le diamètre de la Terre vaut 3,7 diamètres lunaires et non 3, mais l'essentiel de la différence provient de l'imprécision de l'observation et non du caractère conique de l'ombre. Un calcul plus précis était tout à fait réalisable à son époque et fut conduit par Hipparque (v. 190 à 120 av. J.-C.). Mais pour Aristarque, qui était encore un philosophe-astronome, la méthode (géométrique) revêtait beaucoup plus d'importance que le résultat (arithmétique). D'ailleurs, selon Neugebauer, l'angle de 2° n'est qu'une valeur non mesurée utilisée pour la commodité de l'exposé, car il

est facile d'obtenir une mesure bien meilleure; et Archimède, selon la même source, affirme qu'Aristarque considérait $1/2^\circ$ comme la valeur réelle de cet angle. Dans ces conditions, la méthode d'Aristarque aboutirait à une distance Terre-Lune de 80 rayons terrestres. Pour la distance Terre-Soleil (T-S), il observe la Lune lors d'un de ses quartiers exacts. L'angle Terre-Lune-Soleil est alors droit. Terre, Lune et Soleil dessinent un triangle rectangle TLS, rectangle en L. Il lui suffit de mesurer l'angle Soleil, Terre, Lune. Il en déduit alors un encadrement du rapport des distances Lune-Soleil et Terre-Soleil. Il trouve pour l'angle Soleil, Terre, Lune un angle presque droit ($90^\circ - 3^\circ$). Il démontre alors que la distance Terre-Soleil est environ 19 fois plus grande que la distance Terre-Lune. Malheureusement, sa mesure est gravement fautive. Seuls des instruments précis qui n'apparaîtront que plus de mille ans plus tard permettront d'évaluer cet angle à $90^\circ \pm 0,15^\circ$. Ce qui place le Soleil 400 fois plus loin que ne l'est la Lune, Aristarque s'était donc trompé d'environ un facteur 20.



Le Soleil ayant approximativement le même diamètre apparent que la Lune, cela signifie que son diamètre réel est 19 fois plus grand selon Aristarque (en réalité 400 fois plus grand). C'est à l'éclairage de ce résultat qu'Aristarque commence à douter de la théorie du géocentrisme : il lui semble plus logique que les planètes plus petites tournent autour des planètes plus grandes. Il place donc le Soleil au centre de l'univers et décrit le mouvement de la Terre comme une rotation sur elle-même combinée avec un mouvement circulaire autour du Soleil. Cependant, si la Terre se déplace, elle devrait voir les étoiles fixes suivant un angle différent selon la période de l'année. Aristarque émet l'hypothèse que cette différence d'angle (parallaxe) existe bien mais n'est pas décelable car les étoiles fixes sont situées très loin de la Terre. Son hypothèse est exacte. Cette parallaxe est maintenant mesurable. Il semblerait aussi qu'il ait inventé un gnomon hémisphérique plus performant que ceux de son époque.

Les opposants

Toutes ces imprécisions et la force des préjugés de son époque expliquent le fait que cette hypothèse soit rapidement tombée dans l'oubli. Son détracteur Archimède lui reproche un manque de précision dans la « proportion » et de mettre à mal la physique d'Aristote.

Leurs arguments sont principalement :

- la Terre en tant que siège de l'élément le plus lourd a sa place naturelle au centre du monde. Bien qu'Aristarque ait calculé que le diamètre du Soleil était 6,75 fois plus grand que celui de la Terre, il restait à comprendre comment un astre fait de feu, élément plus léger que la terre, pouvait rester immobile dans l'espace. C'est un des arguments philosophiques du géocentrisme;
- si la Terre se déplaçait, il aurait dû être possible d'observer dans les constellations, c'est-à-dire sur la sphère des fixes, des déformations angulaires. Or compte tenu des moyens d'observation de l'époque, il n'était pas possible de voir à l'œil nu le phénomène de la parallaxe;
- si la Terre tournait sur elle-même vers l'est, les objets non fixés sur la terre ne s'envoleraient-ils pas vers l'ouest ? (Il faut attendre Galilée pour réfuter cet argument — qui ne tient pas compte de l'inertie. On ne peut par ailleurs détecter de façon évidente à cette époque l'accélération de Coriolis);
- il est sacrilège d'avoir déplacé le foyer du monde et de s'être opposé au dogme de la Terre-divinité et du feu d'Hestia. Sa théorie présente un contraste saisissant avec la future cosmologie de Ptolémée.

Le commentateur d'Aristote

Aristarque est aussi à l'origine, donc vers 270 av. J.-C., d'un genre philosophique qui se développera : le commentaire des ouvrages d'Aristote, sous forme d'une explication continue et linéaire. Mais le premier commentaire d'Aristote qui nous soit parvenu est celui d'Alexandre d'Aphrodise, vers 200 au II^e siècle.

Postérité

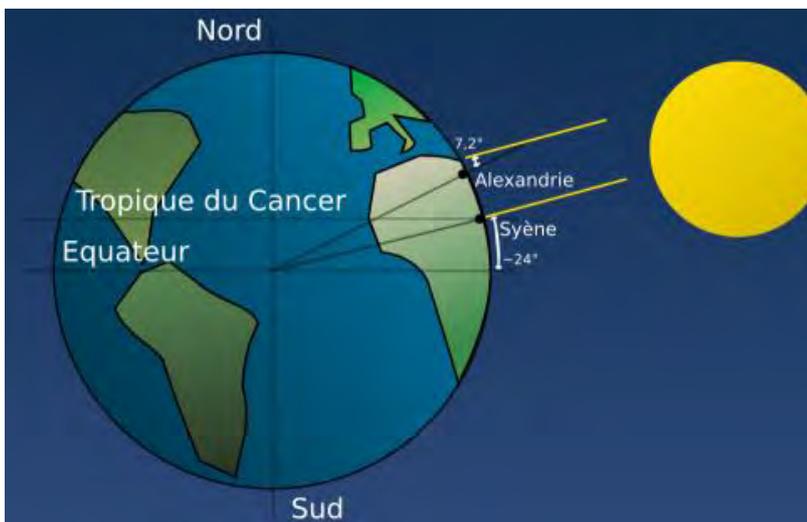
L'astéroïde (3999) Aristarque, ainsi que le plus brillant des cratères lunaires, le cratère Aristarque, ont été nommés en son honneur.

Ératosthène (~276 - ~194 av. J.-C.)

Astronome, géographe, philosophe et mathématicien grec. Nommé à la tête de la bibliothèque d'Alexandrie vers -245 à la demande de Ptolémée III, pharaon d'Égypte, il fut précepteur de son fils Ptolémée IV. Selon Suidas, il se laissa mourir de faim, parce que, devenu aveugle, il ne pouvait plus admirer les étoiles. Mathématicien, il établit le crible d'Ératosthène, méthode qui permet de déterminer par exclusion tous les nombres premiers. En tant qu'astronome, il mit au point des tables d'éclipses et un catalogue astronomique de 675 étoiles. Il démontra l'inclinaison de l'écliptique sur l'équateur et fixa cette inclinaison à, approximativement, $23^{\circ} 51'$. (Elle est actuellement de $23^{\circ} 26'$ [c'est un chiffre qui varie entre $22^{\circ} 2'$ et $24^{\circ} 30'$]). Cela avait déjà été trouvé un siècle plus tôt par Pythéas à Marseille. En histoire, il continua les recherches de Manéthon sur l'Égypte antique, et dressa une chronologie des rois thébains. Il fut l'un des premiers savants, avec Hipparque, à prendre les déclarations, témoignages de son périple, et surtout ses observations astronomiques de Pythéas en considération; au fil du temps, ces récits sont apparus crédibles. Ses études en géographie et en géométrie portaient sur la répartition des océans et des continents, les vents, les zones climatiques et les altitudes des montagnes. On lui attribue le terme *géographie*. Il laissa une carte générale de l'écoumène qui fut longtemps l'unique base de la géographie : il y donnait la valeur de $47^{\circ} 42'$ à l'arc du méridien compris entre les deux tropiques; vingt siècles après lui, l'Académie française des sciences retrouvait à peu près la même mesure ($47^{\circ} 40'$) !

Mesure de la circonférence de la Terre

On attribue en général l'idée de la sphéricité de la Terre à l'école pythagoricienne ou à Parménide dès le VI^e siècle av. J.-C. La Terre était déjà considérée comme sphérique par Platon (V^e siècle av. J.-C.) et par Aristote (IV^e siècle av. J.-C.). La plus ancienne mesure de la circonférence de la Terre qui nous soit connue est rapportée par Aristote et s'élève à 400 000 stades (~ 60 000 km).



Calcul de la circonférence de la [Terre](#)



Ératosthène

La méthode utilisée par Ératosthène est décrite par Cléomède dans sa *Théorie circulaire des corps célestes*. Ératosthène déduisit la circonférence de la Terre (ou méridien terrestre) d'une manière purement géométrique. Il compara l'observation qu'il fit sur l'ombre de deux objets situés en deux lieux, Syène (aujourd'hui Assouan) et Alexandrie, considérés comme étant sur le même méridien, le 21 juin (solstice d'été) au midi solaire local. C'est à ce moment précis de l'année que dans l'hémisphère nord le Soleil détient la plus haute position au-dessus de l'horizon. Or, dans une précédente observation, Ératosthène avait remarqué qu'il n'y avait aucune ombre dans un puits à Syène (ville située à peu près sur le tropique du

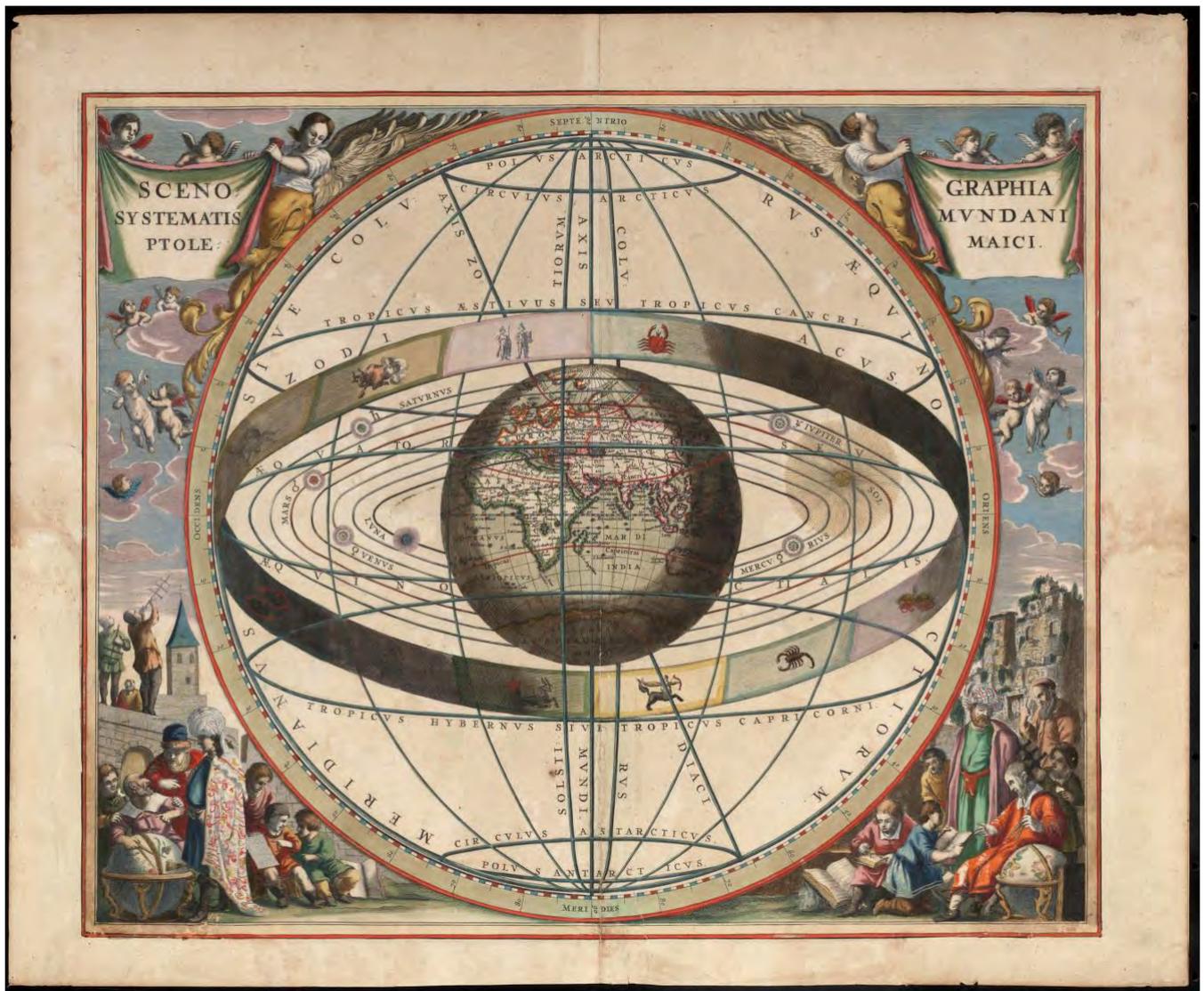
Cancer); ainsi, à ce moment précis, le Soleil était à la verticale et sa lumière éclairait directement le fond du puits. Ératosthène remarqua cependant que le même jour à la même heure, un obélisque situé à Alexandrie formait une ombre; le Soleil n'était donc plus à la verticale et l'obélisque avait une ombre décentrée. En comparant l'ombre et l'obélisque, Ératosthène déduisit que l'angle entre les rayons solaires et la verticale était de $1/50$ d'angle plein, soit 7,2 degrés. Ératosthène évalua ensuite la distance entre Syène et Alexandrie à environ 5 000 stades. Une légende voudrait que les pas des chameaux aient été comptés afin d'obtenir une mesure très précise. Outre le fait qu'aucun texte ne parle explicitement de ceci (l'arpentage pouvait se faire avec des chameaux, réputés avoir le pas régulier, avec des odomètres, bien plus précis, ou se reposer sur le temps de parcours, technique très pratiquée pour les bateaux), on comprend bien que les chiffres arrondis d'Ératosthène constituent un aveu d'imprécision.

Ératosthène considérait comme parallèles les rayons lumineux du Soleil en tout point de la terre. Par la théorie géométrique des angles alternes-internes congrus, Ératosthène proposa une figure *simple* : elle était composée d'un simple cercle ayant un angle au centre de 7,2 degrés qui intercepte un arc (reliant Syène à Alexandrie) de 5 000 stades. Si $1/50$ de la circonférence mesure 5 000 stades, la circonférence de la terre peut être évaluée à 250 000 stades. La longueur exacte du stade utilisé par Ératosthène nous est inconnue. Mais si on suppose qu'il a utilisé le stade égyptien et qu'on évalue celui-ci à environ 157,5 m, on obtient une circonférence de la terre d'environ 39 375 km, mesure très proche de la réalité (les mesures actuelles donnent à l'équateur 40 075,02 km et sur un méridien passant par les pôles 40 007,864 km).

Platon présente les sept planètes dans *La République*, X, 616-617. Il décrit un ordre de huit cercles ou orbites : étoiles fixes, Saturne, Jupiter, Mars, Mercure, Vénus, Soleil, Lune, qui se distinguent par leur rang quant aux distances (de l'extérieur vers l'intérieur : étoiles, Vénus, Mars, Lune, Soleil, Mercure, Jupiter, Saturne), aux couleurs (du plus au moins clair : étoiles, Soleil, Lune, Saturne, Mercure, Jupiter, Mars, Vénus), aux vitesses de révolution (du plus au moins rapide : étoiles, Lune; Mercure, Vénus, Soleil ex æquo; Mars, Jupiter, Saturne).

"On comptait huit pesons... Le premier peson, celui qui était le plus à l'extérieur, avait le rebord circulaire le plus large; le rebord du sixième était le deuxième en largeur; celui du quatrième était le troisième; celui du huitième était le quatrième; celui du septième était le cinquième; celui du cinquième était le sixième; celui du troisième était le septième, et enfin celui du deuxième était le huitième. Et le rebord du plus grand était couvert d'étoiles; celui du septième était le plus brillant celui du huitième recevait sa couleur du septième qui l'illuminait; celui du deuxième et celui du cinquième présentaient une apparence similaire, ils étaient plus pâles que les précédents; le troisième avait l'éclat le plus blanc; le quatrième était rougeoyant; le deuxième arrivait en second pour la blancheur... Parmi les sept, le plus rapide était le huitième, puis venaient le sixième et le cinquième, dont la révolution était simultanée. Le quatrième, engagé dans cette rotation en sens inverse, leur semblait occuper le troisième rang, et le deuxième le cinquième rang. Le fuseau lui-même tournait sur les genoux de Nécessité. Sur la partie supérieure de chaque cercle se tenait une Sirène, qui était engagée dans le mouvement circulaire avec chacun et qui émettait une sonorité unique, une tonalité unique, et de l'ensemble de ces huit voix résonnait une harmonie unique."

La Grèce classique fut la première civilisation à détacher la pratique de l'astronomie des préoccupations de calendrier, de divination ou de culte religieux, au profit d'une volonté de fournir une explication théorique globale des phénomènes astronomiques. Elle apporte d'importantes contributions, notamment la définition du système de magnitude. Autre invention essentielle pour le développement ultérieur de l'astronomie d'observation, Aristote (384–332 av. J.-C.) décrivit le principe de la chambre noire. Mais c'est surtout à l'époque alexandrine (-323 à -30) que l'astronomie connut un essor considérable. La mesure indirecte du diamètre terrestre par Ératosthène, vers 220 av. J.-C., est restée célèbre : la taille de la Terre était calculée en mesurant la longueur de l'ombre portée au même moment par le Soleil à deux endroits différents, Alexandrie et Syène, villes dont on pouvait estimer la distance, en l'interprétant comme une différence de latitude le long d'un méridien de la sphère terrestre. On connaît généralement moins bien la tentative faite par Aristarque de Samos, de rapporter la distance Terre-Soleil à la distance Terre-Lune qui, par suite d'une précision défectueuse dans les mesures d'angle, donne il est vrai une piètre estimation (le rapport est faux d'un facteur 20), mais qui n'en est pas moins correcte dans son principe.



Représentation artistique du modèle géocentrique d'après Ptolémée

Hipparque de Nicée (190-120 av. J.-C.)

Hipparque et d'autres perfectionnèrent des instruments astronomiques qui demeurèrent en usage jusqu'à l'invention de la lunette astronomique, près de deux mille ans plus tard : à savoir le théodolite, à ses débuts sorte de sphère armillaire sophistiquée, où l'on pouvait lire les coordonnées sur la sphère céleste au moyen de graduations. Hipparque le perfectionna encore, pour en faire l'astrolabe, et Ptolémée, à la suite du même Hipparque, donna la description d'une réduction en plan du réseau de parallèles et de méridiens célestes. L'un des rares instruments grecs qui nous soient parvenus à peu près intacts de l'Antiquité est la machine d'Anticythère, le plus vieil appareil connu comportant des engrenages (daté d'env. 100 av. J.-C.). On interprète aujourd'hui son mécanisme comme un calculateur analogique employé pour déterminer la position des planètes, et on attribue à Posidonios (135–51 av. J.-C.) la construction de cet appareil. Tandis que les instruments d'observation se perfectionnaient, les Grecs de cette époque, comme l'avaient fait leurs prédécesseurs, tentèrent d'élaborer une théorie permettant d'expliquer les mouvements des astres. Ils restaient toutefois généralement attachés à certains présupposés philosophiques (géocentrisme, fixité de la terre, mouvements circulaires et uniformes des astres). Comme les observations ne s'accordaient pas totalement à ces principes, ils durent faire preuve d'ingéniosité pour les concilier avec la théorie, qui se devait de « sauver les apparences ». C'est ainsi que naquirent notamment la théorie des sphères homocentriques (Eudoxe de Cnide) et, surtout, la théorie des épicycles, qui est un développement des travaux d'Apollonios de Perga sur l'excentricité des orbites et qui doit très probablement être attribuée à Hipparque. Celui-ci propose donc cette « théorie des épicycles » qui permet à son tour l'établissement de tables astronomiques très précises. Pour la réalisation des premières tables, il bénéficie des observations

mésopotamiennes. Celles dont il dispose, remontant au VIII^e siècle, lui donnent un recul suffisant pour établir notamment, en les joignant à des observations personnelles, les vitesses de déplacement des astres. L'ensemble théorie/tables se révélera largement fonctionnel, permettant par exemple de calculer pour la première fois des éclipses lunaires et solaires. On ignore s'il parvint à réaliser effectivement de tels calculs, mais la méthode peut, sans aucun doute, lui être attribuée. Les calculs d'éclipses étaient en tout cas possibles à l'époque de Ptolémée, selon la méthode exposée dans l'Almageste.



Astrolabe persan (XVIII^e siècle) : instrument pour mesurer les angles célestes

Ptolémée (90 – 168)

Claude Ptolémée, citoyen grec et/ou romain d'Alexandrie, s'est intéressé à la géographie, l'astronomie, l'astrologie, la musique, les mathématiques et l'optique. En lui, c'est l'astronome qui nous intéresse. Il a écrit un ouvrage : l'*Almageste*, qui est le seul ouvrage antique complet sur l'astronomie qui nous soit parvenu. Les astronomes babyloniens avaient mis au point des techniques de calcul pour la prévision de phénomènes astronomiques. Surtout, ils avaient consigné soigneusement, pendant des siècles, de précieuses observations (positions des astres, éclipses,...). Les astronomes grecs, tels qu'Eudoxe de Cnide et surtout Hipparque, avaient intégré ces observations et les leurs dans des modèles géométriques (théorie des épicycles) pour calculer les mouvements de certains corps célestes. Dans son traité, Ptolémée reprend ces différents modèles astronomiques et les perfectionne, notamment en ajoutant la notion d'équant. Ses observations, jointes aux données antérieures dont il disposait, offrent un recul permettant une mesure fort précise des mouvements astronomiques, puisque l'ensemble couvre une période de près de neuf siècles. Ses « tables » de données, indispensables pour déterminer la position des astres, ont en effet comme point de

départ le premier jour du calendrier égyptien de la première année du règne de Nabonassar, c'est-à-dire le 26 février 747 av. J. C. Ptolémée consacre donc le modèle géocentrique d'Hipparque, qui lui fut souvent attribué et qui fut accepté pendant plus de mille trois cents ans, quoique de manière discontinue. En Europe occidentale, en effet, il sombra dans l'oubli au début du Moyen Âge, avant d'être redécouvert à la fin de cette période. Cet héritage fut cependant préservé dans le monde arabe et, avec des hauts et des bas, dans l'Empire romain d'Orient et plus spécifiquement à Byzance. Sa méthode et son modèle de calcul ont d'ailleurs été adoptés avec quelques modifications dans le monde arabophone et en Inde, car ils étaient d'une précision suffisante pour satisfaire les besoins des astronomes, des astrologues, des détenteurs de calendriers et des navigateurs.

Ptolémée réalisa aussi une sorte de manuel essentiellement pratique, appelé « Les tables faciles » ou parfois « Les tables manuelles » dérivé de l'Almageste et destinées à réaliser des calculs de position des astres et d'éclipses.



Ptolémée : portrait allégorique datant de la Renaissance (Paris 1584)

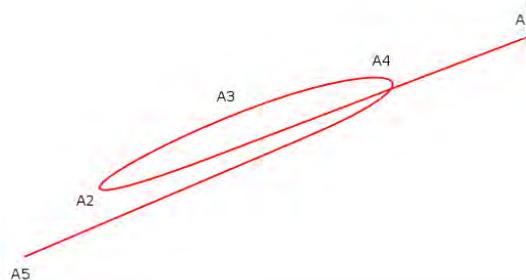
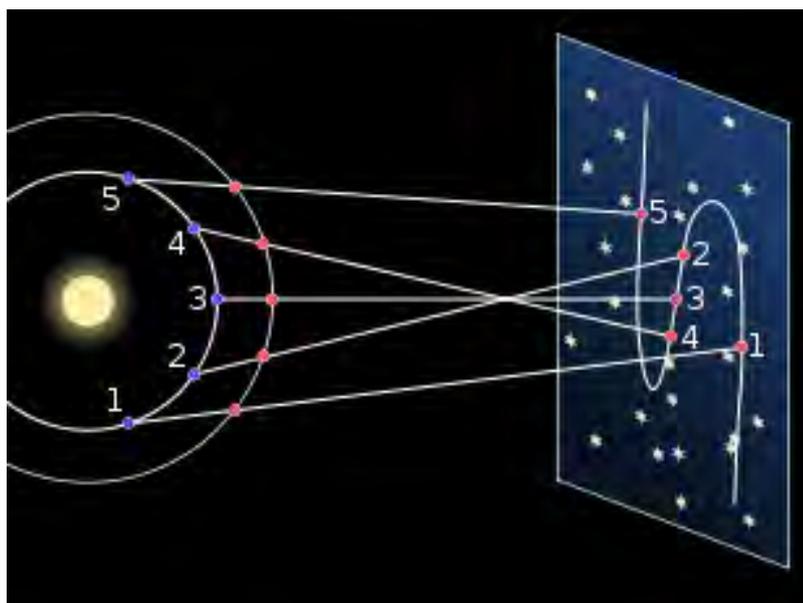
Le principal problème qui se posait à Aristote, Hipparque, Ptolémée et tous ceux qui croyaient fermement en la théorie du géocentrisme (qui était à l'époque une quasi-certitude) était celui de formuler mathématiquement un phénomène qui s'appelle le mouvement rétrograde des planètes dans notre ciel :

La **rétrogradation** ou **mouvement rétrograde** est le recul (c'est-à-dire un déplacement dans le sens inverse de son mouvement naturel) que semble décrire un corps céleste lors de son observation par rapport aux étoiles lointaines.

Explication du phénomène : L'observation du mouvement des planètes se fait à partir de la Terre. Le premier mouvement apparent des planètes et des astres est dû à la rotation de la Terre sur elle-même. C'est un mouvement diurne qui s'effectue d'ouest en est, mouvement dont le Soleil est le premier exemple. Ce n'est pas ce mouvement qui est étudié lors de l'apparition du phénomène de rétrogradation.

Le deuxième mouvement est de l'ordre de l'année ou plus, et est dû aux mouvements de la Terre et des planètes autour du Soleil. Pour observer ce mouvement, il faut choisir un référentiel fixe. Ce sera l'ensemble des étoiles lointaines. Cet ensemble était appelé par les astronomes de l'antiquité jusqu'au XVIII^e siècle, la « sphère des étoiles fixes ». C'est donc par rapport aux étoiles fixes que ce mouvement apparent est mesuré. Observé à partir du Soleil, le mouvement apparent de chaque planète serait circulaire quasi uniforme. Cependant, la source d'observation étant la Terre, le mouvement de la Terre introduit un biais dans l'observation et les planètes extérieures semblent alors parfois reculer dans leur mouvement. C'est ce qu'on appelle le mouvement rétrograde. Il s'explique par les différences relatives de vitesse angulaire de chaque

mouvement. Ce phénomène existe pour les planètes extérieures (de Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune, etc.) mais aussi, dans une moindre mesure pour les planètes « intérieures » (Mercure et Vénus). Dans la réalité du système héliocentrique, ce mouvement rétrograde s'explique facilement.



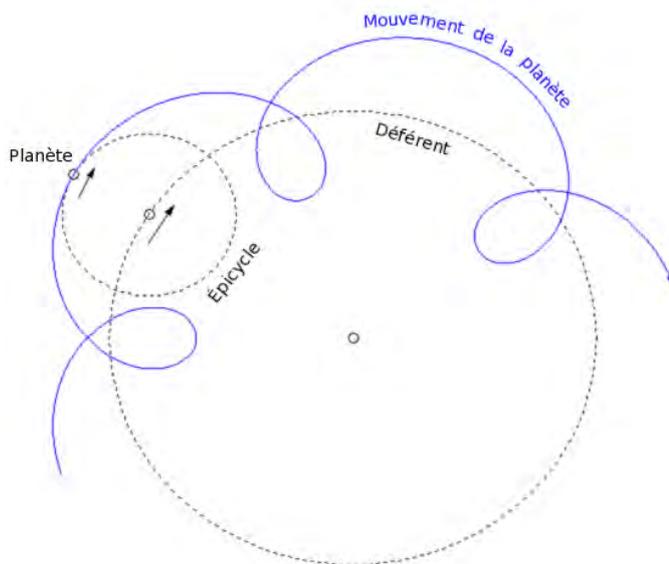
Trajectoire apparente de la planète sur la sphère des étoiles fixes

Le dessin (page précédente à gauche) schématise l'observation du mouvement d'une planète extérieure par projection sur la sphère des étoiles fixes. La Terre et la planète extérieure sont supposées évoluer sur des cercles (en réalité des ellipses de faible excentricité) dont le centre est le Soleil S, la Terre se déplaçant deux fois plus vite (en vitesse angulaire) que la planète observée. Les positions T1, T2..., T5 (en bleu) correspondent aux positions de la Terre à divers moments de l'année et les positions P1, P2..., P5 (en rouge) aux positions correspondantes de la planète. Les mouvements apparents de la planète se lisent par projection sur la sphère des étoiles fixes (considérablement rapprochée sur le schéma), c'est-à-dire aux points A1, A2 et A5. La planète semble alors reculer dans son trajet A2, A3, A4.

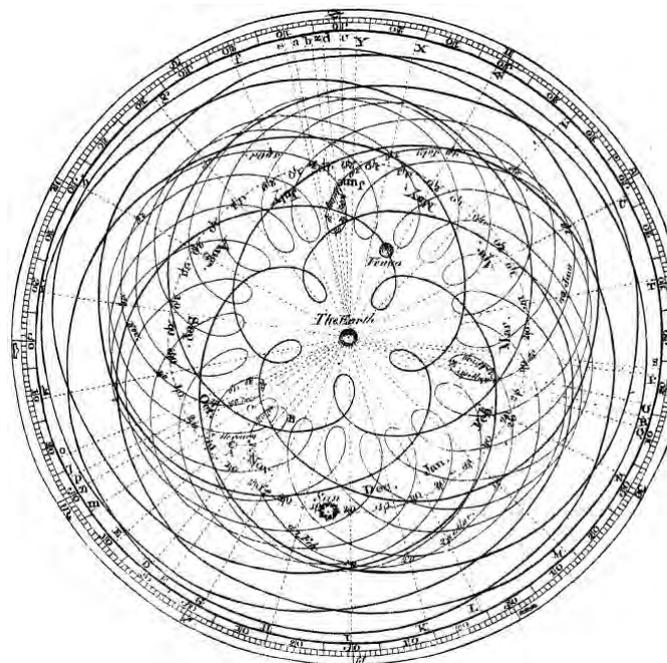
Par contre, l'existence et la constatation d'un mouvement rétrograde a contraint les astronomes tenants du géocentrisme à imaginer des mouvements complexes des planètes pour expliquer ce phénomène, notamment l'épicycle.

Les tenants du géocentrisme ont du trouver des éléments artificiels et compliqués de géométrie pour expliquer comment, depuis une Terre fixe et centrale, les planètes pouvaient avoir ces périodes rétrogrades. Ils ont inventé des orbites planétaires dotées d'épicycles, sortes de petites boucles que devait faire la planète le long de son orbite. Ils n'ont absolument pas vu que leur théorie était fautive sur un autre point : dans le système géocentrique, la Terre est au centre et tout tourne autour d'elle, les planètes, la Lune et... le Soleil. Mais ils auraient du voir que si les planètes avaient, de temps en temps, un mouvement rétrograde (que l'on expliquait en faisant intervenir les épicycles) ni le Soleil ni la Lune (pourtant aussi en rotation autour de la Terre) ne présentaient de mouvement rétrograde. Rien que cela aurait pu leur montrer que leur système géométrique était faux ! D'ailleurs, en regardant bien sur le schéma ci-après à droite, le Soleil se trouve sur un cercle dépourvu de tout épicycle. Ou bien alors c'était admettre que, par nature (?) les orbites des planètes étaient dotées d'épicycles mais pas celle du Soleil...

Contrairement à une idée reçue, Ptolémée ne reprit pas à son compte l'idée d'Aristote selon laquelle les astres étaient placés sur des sphères de cristal. Il dit même expressément que « les astres nagent dans un fluide parfait qui n'oppose aucune résistance à leurs mouvements. On ignore si cette vision, proche de la notion de vide, était déjà présente chez Hipparque ou si elle doit être mise au crédit de Ptolémée. Pour celui-ci, déferents et épicycles sont donc immatériels. Nicolas Halma considère en outre que son choix du système des épicycles plutôt que de celui des excentriques résulte davantage d'une volonté de rendre les calculs plus commodes, que d'une foi dans la réalité matérielle du système. Durant les treize siècles qui suivirent, l'astronomie ne progressa plus guère.



Les planètes tournent sur un épicycle qui lui-même tourne sur un déférent



La complexité des mouvements des planètes dans le modèle géocentrique

L'*Almageste* et les tables faciles ne reçurent que des corrections mineures, bien qu'elles aient fait l'objet, à la fin de l'Antiquité, de nombreuses publications de la part des « commentateurs », dont le plus connu est Théon d'Alexandrie. Ce furent donc les tables et les textes de Ptolémée qui furent utilisés directement ou indirectement comme références, jusqu'à ce que les progrès des instruments d'observation et la théorie élaborée par Nicolas Copernic et perfectionnée par Johannes Kepler n'entraînent son abandon. Mais ce fut à grand peine : le système héliocentrique de Copernic (1543), appuyé par Galilée (1630) fut rejeté par l'Église catholique et Galilée se vit contraint de renier officiellement ses théories en 1633. Le modèle de Ptolémée ne fut définitivement abandonné par l'Église que sous le pape Benoît XIV vers 1750. L'*Almageste* contient également un catalogue de 1 022 étoiles regroupées en quarante-huit constellations. Bien que ne couvrant pas toute la sphère céleste, ce système fut la référence pendant de nombreux siècles. Ptolémée a aussi décrit l'astrolabe, inventé probablement par Hipparque.

Géographie. Ptolémée fut aussi un très grand géographe de son temps. Sa *Géographie* est une œuvre majeure. Il s'agit d'une compilation des connaissances géographiques à l'époque de l'empire romain sous le règne d'Hadrien (125), couvrant la totalité du monde connu ou *écoumène*. Comme pour le modèle du système solaire dans l'*Almageste*, Ptolémée unifie dans un grand ensemble toutes les informations dont il dispose. Le premier livre définit le sujet de la *Géographie* et présente les données et la méthode utilisée pour dessiner une carte du monde habité. Dans les livres 2 à 7, il fournit des listes topographiques et attribue des coordonnées à tous les lieux et particularités géographiques, répertoriant 8 000 endroits d'Europe, d'Asie et d'Afrique disposés dans une grille. Il commence à l'ouest avec l'Irlande et la Grande-Bretagne puis se déplace vers l'est en passant par l'Allemagne, l'Italie, la Grèce, l'Afrique du nord, l'Asie mineure et la Perse, pour terminer en Inde. Le livre 8 présente une division de l'*écoumène* en 26 cartes régionales : dix pour l'Europe, quatre pour l'Afrique (appelée Libye) et douze pour l'Asie. Outre les données géographiques, Ptolémée intègre des données astronomiques et des témoignages de voyageurs. Révisant les calculs d'Ératosthène et d'Hipparque, Ptolémée divise le globe en 360°, en prenant comme base le système sexagésimal des Babyloniens. Il estime la longueur de chaque degré à 500 stades, ce qui lui donne comme circonférence de la terre le chiffre auquel était arrivé Posidonios (180 000 stades, ou 34 500 km), soit 14% de moins que la circonférence réelle qui est de 40 075. La dimension du monde connu couvrait un arc de 177°, allant des îles « Fortunata » (îles des Bienheureux) associées aux îles Canaries, jusqu'à Cattigara, qui correspondrait à Hanoi. La latitude était mesurée à partir de Thulé, situé à 63° N jusqu'à Agisymba dans l'Afrique sub-saharienne, que Ptolémée situe à 16° S, la distance totale couvrant ainsi 79°. Posant l'équateur au degré zéro, comme aujourd'hui, Ptolémée calcule la distance selon la durée du jour le plus long plutôt

qu'en degrés car la durée du solstice d'été passe de 12 h à 24 h au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur vers le cercle polaire. Il utilise des incréments de quinze minutes par degré, jusqu'au parallèle où le jour le plus long dure quinze heures et demie pour alors passer à des incréments de trente minutes, jusqu'à Thulé, où le jour le plus long dure vingt heures. Pour le calcul des longitudes, il fixe le méridien de longitude 0 au point le plus à l'ouest qu'il connaissait, soit les îles Fortunées, en posant des intervalles de cinq degrés correspondant au tiers d'une heure d'équinoxe et couvrant au total douze heures, soit 180°.

Ptolémée s'est essentiellement appuyé sur les travaux d'un autre géographe, Marinus de Tyr, dont les ouvrages ne nous sont pas parvenus. Il s'est aussi basé sur les index géographiques des empires romain et perse, mais la plupart de ses sources au-delà du périmètre de l'empire étaient d'origines douteuses. Des cartes fondées sur des critères scientifiques avaient été réalisées depuis Ératosthène, mais Ptolémée améliora les techniques de projection cartographique, en s'appuyant sur la géométrie d'Euclide, produisant une méthode qui exerça une influence durable sur la façon de projeter une sphère sur une surface plane. Ses cartes sont orientées vers le nord. Une carte du monde développée sur la base de sa *Géographie* était exposée à Autun en France à la fin de l'époque romaine. Cet ouvrage a été perdu dans le monde occidental jusqu'à sa redécouverte par le Byzantin Maximus Planudes, vers 1300. Il se peut que les cartes des manuscrits de la *Géographie* ne datent que de cette époque. En revanche, dès le début du IX^e siècle, il faisait l'objet d'une traduction en arabe pour le calife Abbasside al-Mamun, et il servira de base aux travaux de Ibn Khurradadhbih, Ibn Khordadbeh, Suhrah, Al Kwarizmi, Ibn Hawqal et al Idrissi. À partir du XV^e siècle, les premières reproductions sur papier imprimé firent leur apparition. Le premier exemplaire de la *Géographie* fut édité avec les cartes à Bologne en 1477, rapidement suivi par une édition romaine de 1478. Jusqu'au XVI^e siècle, cet ouvrage a servi de guide à tous les voyageurs qui, à chaque découverte, croyaient reconnaître quelque contrée déjà indiquée par celui-ci. Ptolémée estimait la circonférence de la terre, à laquelle il donnait une forme sphérique, à 180 000 stades (environ 33 345 km), suivant en cela le calcul de Posidonios plutôt que celui d'Ératosthène, qui était beaucoup plus juste. Pour la partie habitable, il assignait une longitude de 72 000 stades et une latitude de 40 000 stades.

Le système géocentrique

Au sein de l'école d'Alexandrie, mais à l'époque romaine, l'œuvre de Ptolémée (vers 150 de notre ère) marque l'apogée de l'astronomie antique : sur la base des connaissances et des théories de son époque (les épicycles), ce savant élaborait le système planétaire qui porte son nom, et qui fut accepté dans les mondes occidentaux et arabes pendant plus de mille trois cents ans. Avec l'*Almageste* (en grec, *Le grand traité*, transmis en arabe classique sous le titre d'*Al megistos*, superlatif grec signifiant « le très grand »), il offrit à l'astronomie une synthèse cohérente des connaissances, dont des tables astronomiques très élaborées. À la suite de Timocharis d'Alexandrie et d'Hipparque, il dressa un catalogue d'étoiles et une liste de quarante-huit constellations, différent du système moderne de constellations. Bien que ne couvrant pas toute la sphère céleste, ces catalogues servirent aux savants jusqu'à la Renaissance.

Les Romains

Quant aux Romains proprement dits, s'ils rangeaient l'astronomie au nombre des **arts libéraux**, ils ne l'enrichirent guère : c'est qu'ils y voyaient surtout un outil de l'astrologie, science divinatoire éminente. Une large partie de la littérature spécialisée fut préservée dans l'Empire romain d'Orient jusqu'à la chute de Constantinople, mais les échanges culturels avec les érudits de l'Occident latin se tarirent dès le Haut Moyen Âge.

Le géocentrisme en question

Il y eut dans l'Antiquité diverses alternatives au géocentrisme. Plusieurs pythagoriciens, notamment, étaient d'avis que le centre de l'Univers est le siège d'un feu central, autour duquel orbitent la Terre, le Soleil et les planètes. Aristarque de Samos, dès le III^e siècle av. J.-C., propose un système héliocentrique dans lequel le Soleil est fixe au centre du monde. Il suggère en outre (comme l'avait fait Héraclide du Pont au IV^e siècle av. J.-C.) que l'axe de la Terre effectue une précession quotidienne par rapport à la sphère des fixes. Pourtant le géocentrisme, avec une Terre immobile autour de laquelle toutes les sphères tournent quotidiennement, demeurera la théorie officielle jusqu'à l'émergence de la théorie héliocentrique de Copernic, lequel s'est inspiré des idées d'Aristarque.

Les apports de l'astronomie grecque et latine antique

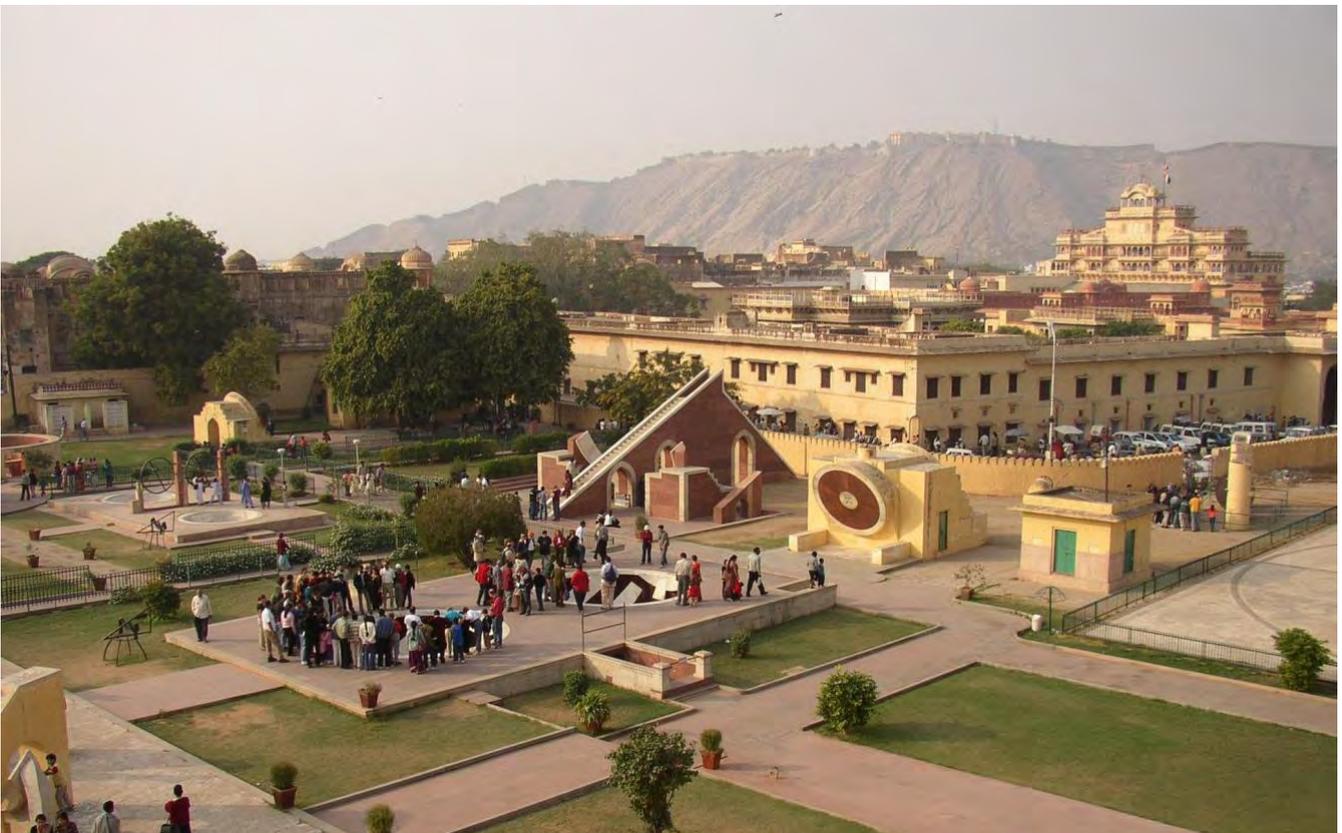
Les principaux enseignements des astronomes grecs peuvent se résumer en gros à ceci :

- la doctrine de la sphéricité de la Terre par caractérisation de l'ombre portée sur la Lune lors des éclipses; vers 200 av. J.-C. premier calcul approché du diamètre terrestre par Ératosthène d'Alexandrie, en mesurant l'ombre portée par le Soleil au même moment en différents lieux);
- le calcul de la position des astres sur leurs orbites et le calcul des dates d'occurrence des éclipses (tables de Ptolémée, reprenant et perfectionnant des tables antérieures. Les premières devraient remonter à Hipparque);
- la discussion de systèmes cosmologiques non géocentriques (Aristarque). Mais cet apport, suivi seulement par Séleucos de Séleucie, restera en sommeil jusque Copernic;
- l'établissement des premiers grands catalogues d'étoiles par Timocharis d'Alexandrie, Hipparque de Nicée, Archimède et Ptolémée (1 022 étoiles);
- la découverte de la précession circumpolaire de l'axe de la Terre ou précession des équinoxes par Hipparque (vers 150 av. J.-C.). Cette découverte expliquait la modification graduelle de l'aspect du ciel et des coordonnées équatoriales des étoiles (ascension droite et déclinaison) sur de longues périodes de temps;
- Pline l'Ancien, qui composa vers l'an 60 une somme des connaissances scientifiques de son époque, considérait que l'astronomie était une connaissance du ciel, et reléguait l'astrologie au rang de pratique divinatoire.

4. Hors du bassin méditerranéen

a. L'astronomie de l'Inde

Vers le I^{er} millénaire av. J.-C., la culture de l'Indus donna naissance à une cosmologie élaborée avec une divinisation des puissances célestes : la Terre, le Soleil (vu comme une pierre incandescente), la Lune, le Feu et les huit demi-quadrants du ciel. C'est un « œuf cosmique » (*puruska*) qui est à l'origine du monde : sa coquille forme la Terre primitive et le ciel étoilé, et l'intérieur est rempli par de l'air.



L'observatoire Jantar Mantar à Jaipur

Comme l'astronomie indienne ne nous a été transmise que sous forme allégorique par les poèmes védiques, il est difficile d'en donner une synthèse ordonnée en peu de mots. D'une manière générale, l'astronomie védique est très proche de l'astronomie babylonienne, ce qui, selon les interprétations et les datations, justifie ou dément la thèse d'un héritage babylonien. Les historiens de l'astronomie continuent d'envisager les deux hypothèses en parallèle, mais le développement autonome de l'astronomie indienne reste plausible, car certains traits communs entre les deux traditions, comme la division du zodiaque en 360 degrés et douze constellations peuvent très bien s'expliquer par l'aspect des phénomènes naturels eux-mêmes. Ainsi l'année est arrondie à 360 jours, avec douze mois comme en Occident. La durée du jour dépend des saisons (« Muhurtas » de 9,6 heures à 14,4 heures), les orbites planétaires s'étalent entre le Soleil et l'étoile polaire. Le Rig-Véda mentionne 27 constellations associées au mouvement du Soleil ainsi que les 13 divisions zodiacales du ciel. Il existe une correspondance remarquable avec la doctrine chrétienne de Teilhard de Chardin : Dieu est un esprit vivant du Monde, son fils contrôle l'expansion de l'Univers.

Vers le VI^e siècle, l'astronomie indienne reçut une impulsion nouvelle avec les idées d'Âryabhata, à qui entre autres on attribue l'invention du zéro. Par la suite, le mahârâja Jai Singh II fera édifier cinq observatoires au début du XVIII^e siècle, entre autres à Delhi et Jaipur. Le plus grand d'entre eux, le Jantar Mantar de Jaipur, comporte quatorze tours d'observation pour la mesure précise des positions astrales.

b. L'astronomie des amérindiens

Même si l'on ne sait que peu de choses des considérations astronomiques des civilisations amérindiennes, leurs édifices culturels et leurs observatoires astronomiques fournissent de précieuses informations. Si la plupart des écrits et des codex aztèques ont été détruits par les conquistadores, on a conservé des traces des calendriers maya et aztèque. Le comput et le calcul des conjonctions planétaires était indubitablement très perfectionné chez certains peuples, notamment les Toltèques, les Zapotèques et les Mayas : ainsi, sans aucun instrument optique, l'astronomie maya avait réussi à décrire avec précision les phases et éclipses de Vénus.



La Piedra del Sol, un calendrier pétroglphe aztèque

Les temps de révolution des cinq planètes visibles à l'époque étaient connus avec une imprécision de quelques minutes seulement. La durée du mois coïncide avec les estimations actuelles à 6 décimales près, ce qui ne représente sur un siècle qu'un écart d'une heure !

c. L'astronomie chinoise

L'**astronomie chinoise** s'est développée sur plusieurs siècles et s'est longtemps montré en avance sur celle du monde occidental. Un très grand nombre d'observations antérieures à la fin du Moyen Âge sont sans comparaison avec ce qui se faisait dans le monde occidental. Une des finalités du développement de l'astronomie était de nature divinatoire.

L'harmonie du ciel, des hommes et de la terre forme une composante essentielle de la philosophie chinoise. Aussi est-ce sous cet angle que l'on envisageait les configurations du ciel. Selon la littérature contemporaine de République populaire de Chine, les Chinois s'efforçaient de prévoir les perturbations possibles de cette harmonie et par là de préserver les croyances des idées étrangères aux influences incalculables. Aussi les astronomes de la Chine impériale n'avaient-ils pas seulement à s'occuper du calendrier, mais étaient également chargés de prévoir les phénomènes célestes inhabituels (par exemple les éclipses de Soleil) et d'effectuer les pronostics astrologiques officiels. Ils connaissaient dès le début du II^e millénaire av. J.-C. le calendrier luni-solaire avec sa période de 19 ans liée aux nœuds lunaires (voir aussi « cycle de saros »). C'était un service scientifique dont les origines se perdent dans la nuit des temps mais que l'on peut sans problème faire remonter aux siècles précédant l'ère chrétienne.

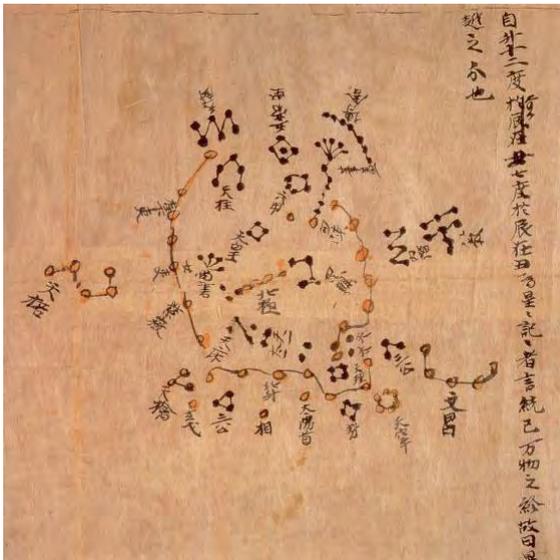
Ce service persista jusqu'en 1911 avec quatre hauts responsables : l'Astronome impérial (Fenxiangshi), responsable du tirage des horoscopes, le premier astrologue (*Baozhangshi*), à qui incombaient les chroniques astronomiques, le météorologiste en Chef (Shijinshi) chargé des prévisions météorologiques et des éclipses solaires, et le Gardien du Temps (Qiehushi), chargé du comput. Encore aujourd'hui, les chroniques astronomiques de Chine ancienne passent pour fiables et relativement complètes. Cela s'explique en partie par le fait que les fonctionnaires chargés de ce travail en répondaient sur leur vie. Ainsi on rapporte que l'astronome Hsi-Ho fut décapité pour avoir manqué la prévision de l'éclipse de Soleil du 3 octobre 2137 av. J.-C., mais cette assertion est très certainement légendaire. Au tournant de l'ère chrétienne, on se mit à observer entre autres des taches solaires, ce qui peut être accompli à l'œil nu au lever et au coucher du Soleil; à noter l'apparition de novae et de supernovae, appelées *étoiles invitées*; et dès 613 av. J.-C. à noter les passages de la comète de Halley.

Selon la cosmogonie de la Chine impériale, il y a cinq régions célestes, correspondant aux quatre points cardinaux et au centre de l'Univers, qui est la zone circumpolaire. À chacun de ces cinq points est associé un palais céleste, tel *Ziwei* pour la zone circumpolaire ou *Tianshi* dans la constellation occidentale d'Ophiuchus. On utilisait des instruments semblables à la sphère armillaire, sans que l'on sache s'il s'agit d'une technique venue des contacts avec le monde méditerranéen ou islamique, ou d'une découverte originale du peuple chinois. On dispose en outre de vieilles cartes célestes dressées pour la navigation océanique. À partir de 1600, les missionnaires importèrent dans le pays les connaissances astronomiques des Européens. C'est ainsi que les observatoires de la dynastie Qing étaient traditionnellement dirigés par des jésuites comme Ignaz Kögler ou Anton Gogei.

Découpage du ciel

Contrairement à l'astronomie occidentale qui s'est à l'origine basée sur l'écliptique, région où se meuvent les planètes ainsi que la Lune et le Soleil, l'astronomie chinoise est basée sur un système de coordonnées équatoriales. L'équateur céleste a ainsi été divisé en plusieurs régions, au même titre que l'écliptique fut découpé en 12 signes du zodiaque. La subdivision de la bande équatoriale se fait par 28 régions appelées loges lunaires, qui présente la propriété d'être de taille extrêmement variée, allant de 33 degrés pour la plus large (Dongjing), à moins d'un degré pour la plus étroite.

La raison d'une telle disparité dans les tailles des loges lunaires n'est pas connue à ce jour (2007). Chacune des frontières entre maisons lunaires est repérée par une étoile de référence, la frontière correspondant au méridien reliant cette étoile aux pôles célestes. Ces étoiles référentes sont situées au voisinage de l'équateur céleste, mais à des déclinaisons variables.



Carte des constellations (Chine ancienne)



Dessin d'un astronome chinois en 1675

À chaque loge lunaire était associé un astérisme de taille modeste, comprenant l'étoile référente de la loge lunaire. Un **astérisme chinois** est un astérisme décrit par l'astronomie chinoise. Cette dernière a, tout comme l'astronomie occidentale, procédé à une partition de la sphère céleste en plusieurs régions. Ces régions, plus nombreuses et plus petites que les constellations occidentales, sont au nombre de 283 pour un total de 1450 étoiles, soit une moyenne de 5 à 6 étoiles par astérisme. Cependant, ces derniers varient considérablement en taille et en nombre d'étoiles, allant d'une seule étoile pour certains à une trentaine pour les plus gros. Les astérismes ne couvrent pas tout le ciel, mais uniquement la portion de celui-ci accessible à des observateurs situés aux latitudes de l'empire chinois, soit environ toutes les déclinaisons supérieures à -55 degrés. Parmi ces astérismes figurent 28 « **loges lunaires** », qui forment essentiellement l'équivalent d'une subdivision du zodiaque. Contrairement aux signes du zodiaque, qui forment une subdivision régulière de la bande zodiacale, les loges lunaires sont de taille variable, allant de 1 degré pour Zuixi (situé dans la constellation d'Orion), à 33 degrés pour Dongjing, situé dans les constellations des Gémeaux et du Cancer.

L'astérisme portait le même nom que la loge lunaire correspondante, mais empiétait en général sur la loge voisine. Selon les cas, une référence au nom d'une loge lunaire peut correspondre à la loge elle-même (c'est-à-dire une bande d'ascension droite) ou le seul astérisme. La mesure de la largeur de chaque loge lunaire a été soigneusement effectuée par les astronomes chinois. Du fait de la précession des équinoxes et de la façon dont étaient définies les loges lunaires, la largeur de chacune d'elles était soumise à des variations. En particulier, la loge la plus étroite, Zuixi a peu à peu été réduite, jusqu'à virtuellement disparaître vers 1280. C'est l'observation de ce phénomène qui a amené les astronomes chinois à découvrir la précession des équinoxes, quoique significativement plus tard que l'astronome grec Hipparque.

Le reste de la sphère céleste a également fait l'objet d'une division en divers astérismes, à l'image des constellations de l'astronomie occidentale. Néanmoins ces astérismes étaient significativement plus petits, leur nombre total se montant à environ 283. La localisation générale de ces astérismes est connue, mais leur composition exacte est sujette à caution, les positions exactes des étoiles les composant étant rarement données. De plus, la plupart des cartes du ciel parvenues jusqu'à nous dessinent les astérismes de façon relativement stylisée, rendant leur localisation générale aisée, mais leur composition exacte difficile, d'autant que les cartes ne représentent pas les étoiles différemment en fonction de leur magnitude apparente. Les seules cartes classant effectivement les étoiles en fonction de leur brillance datent du XVI^e siècle, date à laquelle des astronomes jésuites avaient interagi avec les astronomes chinois. Les auteurs de ces cartes n'étant pas identifiés, il est difficile de savoir si elles représentent fidèlement les astérismes traditionnels des astronomes chinois, ou l'interprétation que se faisaient les astronomes jésuites de ceux-ci. Même des astérismes simples et comprenant un faible nombre d'étoiles comme Wangliang et Nanmen voient leur composition exacte sujette à débat à l'heure actuelle. La détermination de la composition exacte de ces astérismes représente un intérêt aujourd'hui pour l'identification de la localisation exacte de certains

phénomènes astronomiques, notamment des « étoiles invitées » (en pratique des novae, supernovae et comètes) dont l'observation était soigneusement notée. En pratique, les astérismes situés au voisinage de l'écliptique sont les mieux identifiés, car la mention du déplacement des planètes au sein de ceux-ci permet en général d'en dessiner les contours précis. La façon dont le découpage du ciel a été opéré n'est pas connue avec précision. Il n'existe pas de carte complète du ciel (complète pour un observateur situé aux latitudes de l'empire chinois, c'est-à-dire ne descendant pas en dessous d'une déclinaison de -55 degrés) avant le VII^e siècle. Les cartes plus anciennes sont parcellaires ou montrent seulement un petit nombre d'astérismes. On estime cependant que la cartographie détaillée (avec les moyens de l'époque) de la voûte céleste date du quatrième siècle avant notre ère. La carte du ciel bien conservée la plus ancienne est une gravure sur pierre de taille imposante (un mètre de largeur pour deux de hauteur) date de 1247. Elle est aujourd'hui conservée au musée de la ville de Suzhou. Une autre carte du même type date de 1395, et actuellement visible au palais Doksu de Séoul en Corée du Sud. Son étude révèle cependant qu'elle correspond à la configuration du ciel vers l'an -25 avant notre ère (déterminée grâce à la position exacte du pôle nord céleste en tenant compte de la précession des équinoxes), qui laisse penser que la cartographie du ciel était déjà bien avancée dès cette époque.

Calendrier et découpage du temps

Le calendrier utilisé dans le monde chinois était de nature luni-solaire, c'est-à-dire composé d'un nombre entier de mois lunaires. Chaque mois commençait au jour prédit de la nouvelle lune, contrairement au calendrier du monde arabe, dont le début des mois lunaires dépendaient de l'observation du premier croissant de lune. Douze mois lunaires représentant moins qu'une année tropique complète, un mois intercalaire était rajouté à un certain moment de l'année tous les deux ou trois ans. L'année était divisée en saisons, mais contrairement au calendrier occidentaux, les saisons étaient centrées sur les solstices et les équinoxes et non séparées par eux. La dernière saison de l'année était l'hiver, centré sur le solstice d'hiver, aussi l'année commençait-elle aux environs du mois de février actuel, ou fin janvier. En fait, le nombre de mois de l'année (c'est-à-dire l'adjonction d'un mois intercalaire cette année-là) était déterminé par la contrainte que le solstice d'hiver se produise lors du onzième mois. Les années étaient en général numérotées à partir de l'accession au trône de l'empereur du moment, et parfois selon diverses époques de ce règne. En sus de ce calendrier était également utilisé un cycle de 60 jours nommé *ganzhi*. Les jours de ce cycle étaient nommés suivant deux groupes de syllabes, le premier groupe (*tiangan*, litt. « tiges célestes ») en comprenant 10 et le second (*dizhi*, litt. « branches terrestres ») 12, mais seule une combinaison sur deux étant valide. Très souvent, les dates sont données en terme du calendrier luni-solaire et se voient accompagnées de la position de jour correspondant du *ganzhi*. Cette double dénomination rend plus facile aujourd'hui la conversion des dates en terme du calendrier grégorien.

La journée était basée sur plusieurs subdivisions, les deux plus communes étant les *shi*, périodes d'égale durées de deux heures et les *ke*, correspondant à un centième de jour (soit environ 14 minutes et 24 secondes). Le premier *shi* était centré sur le minuit en temps solaire, correspondant donc à la période de 23h à 1h. Les noms de ces *shi* étaient les mêmes que ceux des *dizhi* utilisés pour repérer les jours dans le cycle sexagésimal du *ganzhi*. La date civile changeait à minuit, à l'exception notable des observations astronomiques, qui étaient toutes datées du jour précédent la nuit d'observation. Une subdivision alternative du déroulement de la nuit était le *geng*, correspondant à cinq subdivisions de durée identique de la nuit. La durée d'un *geng* était par contre variable au cours de l'année (de 1h40 à 2h40 pour la latitude de 35 degrés du centre de la Chine), du fait de la variation annuelle de la durée des jours et des nuits. La période de la journée commençait au lever astronomique du Soleil et se terminait au coucher de celui-ci. De façon conventionnelle, une période d'aube et de crépuscule de 3 *ke* était reconnue, correspondant au crépuscule civil actuel.

Les chinois firent aussi de très nombreuses observations. La plus connue est celle de la **nébuleuse du Crabe** (M1, NGC 1952) qui est un rémanent de supernova résultant de l'explosion d'une étoile massive en supernova historique (SN 1054) observée par un astronome chinois durant la période de la dynastie Song de juillet 1054 à avril 1056 (presque 2 ans !). Située à une distance d'environ 6.200 a.l. de la Terre, dans la constellation du Taureau, la nébuleuse a un diamètre de ~10 a.l. C'est le premier objet astronomique à avoir été associé à une explosion historique de supernova (voir dans **Iconographie**).

III Le Moyen-Âge

A) L'astronomie de l'Europe médiévale

Au Moyen Âge, le savoir astronomique de l'Antiquité restait vivace parmi les érudits hellénophones de l'Empire byzantin. Au contraire, jusqu'au XII^e siècle, l'Occident latin n'avait conservé que fort peu de textes scientifiques. S'il est vrai qu'on respectait toujours le canon traditionnel des arts libéraux, où l'astronomie forme une composante à part entière du *quadrivium*, en pratique les écoles des monastères du Haut Moyen Âge n'enseignaient généralement que le *trivium*, qui ignore les sciences mathématiques.

Avec les réformes politiques de Charlemagne, l'astronomie retrouva son rang de discipline d'enseignement : l'empereur ordonna à toutes les églises cathédrales de créer des écoles où l'astronomie viendrait s'ajouter aux disciplines traditionnelles (géométrie, arithmétique et musique) pour reformer le quadrivium, avec l'idée également de former les clercs au calcul du comput, traditionnellement abandonné aux rabbins. Saint Bède le Vénérable au VIII^e siècle développa en Occident les arts libéraux (trivium et quadrivium). Il établit les règles du comput pour le calcul des fêtes mobiles, et pour le calcul du temps, qui nécessitaient des éléments d'astronomie.



Personnification de Céphée d'après le manuscrit des Phénomènes d'Aratos de Leyde (IX^e siècle)

Au X^e siècle Gerbert d'Aurillac (le pape Sylvestre II) étudie les sources scientifiques arabes en Catalogne où il intègre outre l'Écriture décimale positionnelle, les connaissances astronomiques liées à l'astrolabe dans le traité *Sententiae astrolabii* traduit par Lupitus de Barcelone en 980. Ces réformes n'eurent toutefois pas le succès durable escompté, de sorte que les connaissances astronomiques demeurèrent en pratique rudimentaires. C'est en tout cas à l'époque carolingienne que reparut une copie des *Phænomena*, poèmes didactiques d'Aratos de Soles, sous la forme du manuscrit somptueusement enluminé des *Aratea de Leyde*, vraisemblablement une donation de Louis le Pieux. Ces poèmes ont dû être rapportés de Lotharingie par un certain *Astronomus* qu'on ne connaît qu'au travers du titre de ses œuvres. Les textes d'astronomie les plus répandus jusqu'à la fin du Moyen Âge sont, outre les *Phænomena* d'Aratos, les descriptions de

constellations d'Hygin dans son *Poeticon Astronomicum*. Toutes les connaissances de mythologie classique liées aux constellations provenaient essentiellement de ces deux ouvrages. Les enluminures sont d'une grande valeur artistique. En revanche, les positions données aux astres par les enlumineurs n'ont pratiquement rien à voir avec la réalité de la sphère céleste; elles ont été modifiées pour mieux coïncider avec les représentations allégoriques des constellations. Les autres traités d'astronomie des auteurs de l'Antiquité ne furent recopiés que par la suite, avec les débuts de la scolastique au XII^e siècle : Gérard de Crémone produisit la première traduction en latin de l'Almageste à partir d'une traduction arabe. Puis ces textes (essentiellement Ptolémée et Aristote) furent de plus en plus commentés. Quant à les compléter, les rectifier ou éprouver leur contenu par de véritables observations des cieux, cela dépassait la conception que l'homme médiéval se faisait de la Connaissance.

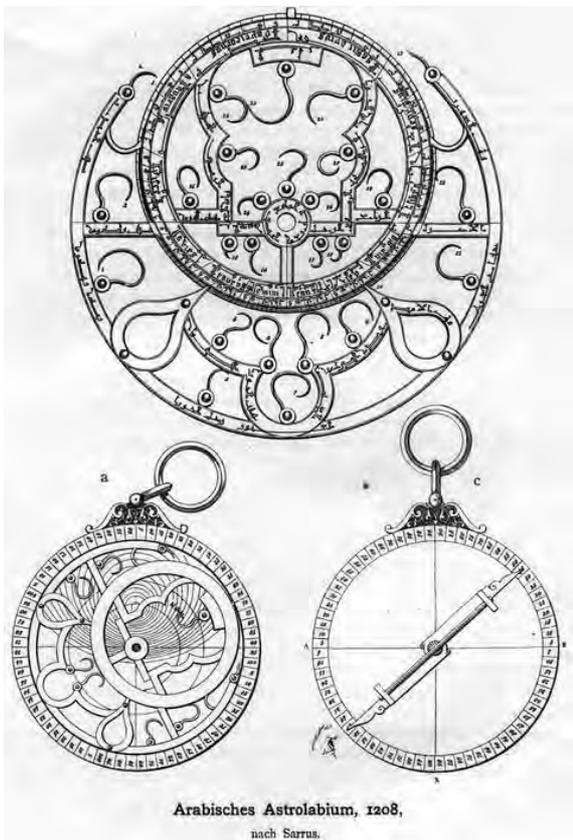
B) L'astronomie arabe

Le renouveau de la discipline se produisit avec la conquête islamique. Pour naviguer sur mer mais aussi s'orienter dans le désert, les civilisations arabes avaient besoin de données précises. Dérivée de l'astronomie indienne, l'astronomie arabe sut tirer parti d'un système de numération perfectionné. Chez les conquérants, les plus grands savants étaient souvent Astronomes de cour, mathématiciens ou médecins. Les avancées arabes concernent surtout l'astrométrie : on effectua des observations précises du ciel (dans un but essentiellement astrologique, même si l'islam voyait d'un mauvais œil les tentatives de prédire l'avenir, et interdisait la pratique de l'astrologie) et l'on dressa un nouveau catalogue d'étoiles, dont les noms ont finalement supplanté leurs prédécesseurs et sont toujours en usage : « Aldébaran », « Rigel », « Deneb », « Bételgeuse », etc. On perfectionna également les instruments d'observation comme l'astrolabe. À partir du IX^e siècle, l'astronomie devient florissante, en contraste avec le déclin occidental. L'astronome persan al-Farghani (805–880) écrit sur le mouvement des corps célestes. Il effectue une série d'observations qui lui permettent de calculer l'obliquité de l'écliptique. Al-Kindi (801–873), philosophe et scientifique encyclopédique, écrit 16 ouvrages d'astronomie. Parmi les autres astronomes significatifs, citons :

- Al-Battani (855–923), astronome et mathématicien;
- Al-Hasib Al Misri (850–930), mathématicien égyptien;
- Rhazès (864–930), médecin iranien;
- Al-Fârâbî (872–950), grand philosophe et scientifique;
- En Perse, Omar Khayyam (1048–1131), célèbre poète qui compile une série de tables et réforme le calendrier;
- Al-Biruni, (973–1048), mathématicien, astronome, encyclopédiste, etc.;
- al-Kashi (1380–1429), en Iran et Ouzbékistan actuels;
- et encore citer al-Maghribi, Al-Sufi.

Dès la fin du X^e siècle, un grand observatoire est construit près de Téhéran par l'astronome Al-Khujandi.

Dans l'histoire de l'astronomie, l'**astronomie arabe**, ou astronomie musulmane, renvoie aux travaux astronomiques accomplis par la civilisation islamique, particulièrement au cours de l'Âge d'or de l'Islam (VIII^e siècle - XVI^e siècle), et transcrites pour la plupart en langue arabe. Ces découvertes ont été effectuées pour l'essentiel dans les sultanats du Moyen-Orient, d'Asie centrale, dans l'Al-Andalus, en Afrique du Nord, puis plus tard en Chine et en Inde. Les débuts de l'astronomie ont procédé d'un cheminement semblable aux autres sciences dans l'Islam, par l'assimilation de connaissances de l'étranger et la composition de ces éléments disparates pour faire naître une tradition originale. Les principaux apports sont indiens, perses et grecs, connus par des traductions puis assimilés. Par la suite, l'astronomie arabe exercera à son tour une influence significative sur les astronomies indienne et européenne et même sur l'astronomie chinoise. Un nombre impressionnant d'étoiles et notamment plusieurs d'entre-elles visibles à l'œil nu dans le ciel, comme Aldébaran (α Tauri) et Altaïr (α Aquilae), ainsi que plusieurs termes d'astronomie comme « alidade », « azimuth » et « almucantar » témoignent par leur morphologie de leur origine arabe. Avec environ 10 000 manuscrits conservés à travers le monde, dont une grande partie n'a toujours pas fait l'objet d'un inventaire bibliographique, le corpus astronomique arabe constitue l'une des composantes les mieux préservées de la littérature scientifique médiévale.



Arabisches Astrolabium, 1208,
nach Sarrus.

Un astrolabe arabe de 1208



Astrolabe d'al-Shali (Tolède-1067) - Musée archéologique de Madrid.

Facteurs de développement

Il existe plusieurs facteurs favorisant le développement de l'astronomie arabe, certains sont communs à toutes les sciences comme le désir de connaître le monde environnant, ou bien la structure du monde arabe favorisant les échanges de savoir.

Une autre impulsion résulte des pratiques religieuses propres à l'islam, qui recèlent une foule de problèmes d'astronomie mathématique. La résolution de ces problèmes par les savants musulmans est allée bien au-delà des méthodes mathématiques des Grecs. L'étude des étoiles est également liée au désir de connaître l'avenir. L'astrologie joue donc aussi un rôle dans le développement de l'astronomie arabe.

Structure du « monde arabe »

Les historiens discernent plusieurs facteurs favorables au développement de l'astronomie arabe. Le premier est la proximité des pays musulmans avec le monde de l'Antiquité classique. Un nombre considérable d'écrits grecs, sanskrits et pehlevins furent traduits en arabe dès le IX^e siècle. Ce mouvement était possible grâce au respect envers les savants d'autres cultures. Le monde arabe, par son étendue, offrit la possibilité de mettre en commun des traditions scientifiques différentes, venant de pays différents, aux cultures différentes et aux hommes de religions différentes, dans une langue scientifique commune qui fut la langue arabe. Cette langue permit des échanges autant sur des textes anciens que sur des textes contemporains et favorisa la mise en place d'une tradition de correspondance scientifique. La structure du monde arabe favorisa également le déplacement des savants et la nouvelle pratique du voyage scientifique. Le mécénat enfin, principalement celui des califes, permit de créer de grands centres de recherches comme celui de Bagdad au temps d'Al-Ma'mūn.

Facteurs religieux

L'islam a influencé l'astronomie de manière à la fois directe et indirecte. La discipline religieuse, en posant un certain nombre de problèmes liés au calendrier, a donné un élan décisif à l'épanouissement de l'astronomie mathématique, même si, selon Ahmed Djebbar, la composante religieuse n'a été qu'un élément parmi d'autres dans le développement de l'astronomie arabe.

Pratiques islamiques

Plusieurs règles de l'islam ont poussé les fidèles à améliorer calculs et observations astronomiques.

Un premier motif est le calendrier musulman et plus précisément la détermination de la période du Ramadan. Ce calendrier s'appuie sur des mois lunaires et nécessite de déterminer le mouvement de la lune. Les mois, dans la religion musulmane, ne commencent pas avec la nouvelle lune astronomique, définie comme l'instant où la lune a la même longitude écliptique que le soleil (elle est donc invisible, noyée dans l'albédo solaire); les mois commencent lorsque le croissant lunaire commence à apparaître au crépuscule.

Un second motif est la détermination de la qibla ou direction de La Mecque. L'Islam demande aux musulmans de prier en se prosternant dans la direction de la Kaaba à La Mecque et d'orienter leurs mosquées dans cette direction : ils ont donc besoin de savoir trouver la direction de cet endroit, où qu'ils se trouvent sur Terre.

Un dernier problème est la détermination du moment de la *Salat*. Les musulmans doivent pouvoir déterminer les heures locales de prière à cinq moments de la journée (de l'aurore au soir), dans toute l'étendue d'un vaste empire.

Les directions étaient déterminées à partir de la position du Soleil et des étoiles, et l'heure locale à partir de la direction et l'élévation du Soleil. Ces méthodes n'étaient pas entièrement nouvelles, mais les scientifiques arabes les ont rendues plus précises grâce à leur développement de la géométrie sphérique et de la trigonométrie.

Solutions trouvées et recours à la géométrie de la sphère

Le calcul du jour où le croissant lunaire recommence à devenir visible constituait un redoutable défi pour les savants arabes. Bien qu'en effet la théorie de Ptolémée du mouvement composé de la lune soit assez exacte à l'époque de la nouvelle lune, elle ne donne la trajectoire de la lune que par rapport au cercle de l'écliptique. Pour prédire quel jour la lune commence à redevenir visible, il fallait pouvoir décrire son mouvement par rapport à l'horizon, un problème dont la résolution appartient à une géométrie sphérique assez sophistiquée. Bien que la visibilité effective du croissant soit en principe exigée, et que cette méthode expérimentale soit couramment utilisée pour fixer le début du ramadan, la question posée aux astronomes était de trouver une méthode pour prédire cette visibilité. Ce problème n'a pas été étudié spécifiquement par les Grecs mais on trouve des méthodes de calculs dans la tradition indienne, reprises par la création des premières tables de Ya'qūb ibn Ṭāriq (en) et Al-Khwarismi. Mais ce sont les astronomes Habash al-Hasib et Thābit ibn Qurra qui, s'appuyant sur l'Almageste de Ptolémée, en font une étude mathématique. La détermination de la direction de la Mecque s'est faite de manière empirique ou de manière approchée avant et même après la solution mathématique du problème. La résolution de ce problème revient à déterminer l'angle d'un triangle sphérique connaissant la longitude et la latitude de deux points (lieu d'observation et lieu de La Mecque) et se résout en géométrie sphérique grâce à la formule de la cotangente. La première détermination mathématique, utilisant une méthode géométrique, emprunté à des sources grecques et connue sous le nom d'analemme est développée par Habash al-Hasib mais c'est le développement de la trigonométrie sphérique et la création de nouvelles fonctions telles la tangente qui donnent les outils pour une solution mathématique du problème. De même la détermination de l'heure des *salat* s'est d'abord effectuée de manière empirique. Cette préoccupation a suscité un intérêt pour la gnomonique et de nombreux traités ont été écrits sur l'étude des ombres d'un gnomon standard selon le lieu et l'époque de l'année. Des tables apparaissent très tôt, destinées à régler les heures des prières (Al-Khwarismi). La fixation des heures des prières est normalement attribuée au muezzin mais à partir du XIII^e siècle, on voit apparaître des astronomes professionnels, muwaqqit ou moqati, chargés d'effectuer les calculs et spécialisés dans la géométrie de la sphère. La résolution mathématique de ce problème suppose en effet que l'on sache calculer le côté d'un triangle sphérique de la sphère céleste à partir de ses trois angles et des deux autres côtés; pour trouver l'heure sidérale, par exemple, il faut savoir construire le triangle dont les sommets sont le zénith, le pôle nord, et la position du Soleil. L'observateur doit connaître l'ascension droite du Soleil et celle du pôle : la première peut être mesurée au sextant, et la seconde n'est autre que la latitude de l'observateur. L'heure est donnée par l'angle entre le méridien (l'arc compris entre le zénith et le pôle) et le cercle horaire du Soleil (c'est-à-dire l'arc compris entre le Soleil et le pôle).

Astrologie

L'astrologie astronomique repose sur l'idée que le mouvement des astres influe sur les événements et sur la vie des êtres humains. Selon ce point de vue, il est alors nécessaire de connaître la position des astres pour anticiper leurs effets, et donc de faire appel aux astronomes. Malgré l'interdit prononcé par la religion sur tout phénomène de divination, l'astrologie ne cessa pas d'être pratiquée dans le monde musulman. Le désir des puissants de connaître l'avenir favorisa les programmes scientifiques d'observation des étoiles. Ainsi, astronomie et astrologie furent pendant longtemps considérées comme des disciplines complémentaires même si ces deux disciplines étaient en général exposées par un même auteur dans des traités différents. Pour éviter d'être confondus avec les astrologues et de tomber sous le coup des interdits religieux, les astronomes donnèrent un nom spécifique à leur activité : *Ilm al-Hay'a* (ou *Science de la configuration de l'univers*). Si l'on trouve des défenseurs de l'astrologie comme Abou Ma'shar al-Balkhî, de nombreux astronomes critiquèrent cette discipline. Parmi eux, on peut citer l'astronome persan al-Biruni au XI^e siècle, al-Fârâbî, Alhazen, Avicenne, Averroès, Maïmonide et Ibn Qayyim al-Jawziyya.

Histoire

La connaissance du ciel dans l'Arabie pré-musulmane n'était qu'empirique : elle se limitait à une étude du lever et du coucher des astres pour découper l'année, étude qui se poursuivit d'ailleurs pendant la période islamique avec les méthodes mathématiques qui apparaissent alors. Les débuts de l'astronomie ont procédé d'un cheminement semblable aux autres sciences dans l'islam, par l'assimilation de connaissances de l'étranger et la composition de ces éléments disparates pour faire naître une tradition originale. Les principaux apports sont d'abord indiens et perses, puis grecs et ce sont ces derniers qui exercent l'influence la plus profonde. Ils se répandent par des traductions et des commentaires.

L'historien des sciences Donald Routledge Hill divise l'astronomie arabe en quatre périodes :

- assimilation par syncrétisme des doctrines astronomiques hellénistiques, indiennes et perses (c.700—c.825),
- phase de recherche intense, réception et amélioration du système de Ptolémée (c.825—c.1025),
- épanouissement d'une école de pensée spécifiquement arabe en astronomie (c.1025—c.1450),
- stagnation, encore ponctuée de quelques contributions remarquables (après 1450).

Premiers apports de l'étranger (700-825)

Cette période fut essentiellement marquée par une assimilation et un syncrétisme des doctrines astronomiques hellénistiques, indiennes et perses antérieures. Elle vit la traduction de plusieurs écrits sanskrits et pehlevins en arabe. Des ouvrages d'Aryabhata et Brahmagupta sont cités très tôt par les astronomes arabes. Une célèbre traduction due à la plume de Muhammad al-Fazari et de Yaqūb ibn Tāriq parut vers 777 sous le titre de *Zij al-Sindhind* (ou *Tables astronomiques indiennes*). Les sources disponibles révèlent que ce texte fut traduit après la visite d'un astronome indien à la cour du calife Al Mansour en 770. On trouve également dans des écrits arabes du VIII^e siècle des références à un recueil de chroniques astronomiques compilées sur deux siècles dans la Perse des Sassanides et connu en arabe sous le nom de *Zij al-Shah* (ou *Tables Royales*). Mais il s'agissait pour les traducteurs de présenter une simple compilation de connaissances sans vérification. Des fragments de cette période témoignent de l'adoption par les Arabes des tables de sinus (héritées des mathématiques indiennes) de préférence aux tables des cordes employées par les astronomes grecs. Autre héritage des Indiens, une formule approchée de l'heure saisonnière adoptée par les astronomes arabes.

L'intérêt des Arabes pour l'astronomie a cru parallèlement à celui pour les mathématiques. De ce point de vue, le rôle joué par l'*Almageste* (composé vers l'an 150) de l'astronome alexandrin Ptolémée (vers 100 - 178) fut exemplaire. L'*Almageste* a effectivement fait date en astronomie, rassemblant, à l'instar des *Éléments* d'Euclide pour la géométrie, toutes les connaissances contemporaines de leur auteur. Cet ouvrage, dont le titre original est *La composition mathématique*, acquit au fil des siècles le titre d'usage de *Grande Astronomie*. Les Arabes l'intitulèrent à leur tour *Le Très Grand*, ajoutant au superlatif grec *megiste* (« Très Grand ») l'article défini arabe *al-* : ainsi l'ouvrage a-t-il été transmis à l'Occident latin sous le titre d'*Almageste*. Bien qu'une grande partie de l'*Almageste*, se révéla inexact au fil du progrès des observations, il demeura un des piliers de l'enseignement de l'astronomie tant dans le monde musulman qu'en Europe

jusqu'à la révolution copernicienne. D'autres ouvrages de Ptolémée influencèrent l'astronomie arabe : *Le livre des hypothèses*, *Le Phaësis* et *les Tables faciles*. On trouve également des références à une série de textes grecs connus sous le nom de « petite collection astronomique » et regroupant des traités d'astronomie et de géométrie d'Euclide, Théodose de Tripoli, Autolykos de Pitane, Aristarque de Samos et Ménélaos d'Alexandrie. Une partie de cette science grecque parvint dans le monde arabe par des sources syriaques. Ainsi, al-Hasan ibn Quraysh traduisit l'Almageste du syriaque en arabe dans le courant du VIII^e siècle.

Triomphe du système de Ptolémée (~ 825 - ~ 1025)

La période qui s'étend du IX^e siècle au début du XI^e siècle fut marquée par d'intenses recherches, à la suite desquelles on reconnut d'abord la supériorité du système de Ptolémée sur les autres, et où on lui apporta diverses précisions. La recherche astronomique étant vivement encouragée par le calife abbasside al-Ma'mūn, Bagdad et Damas devinrent des centres scientifiques majeurs. Non seulement les califes apportaient à ces travaux un soutien financier, mais ils conféraient aux savants un réel prestige.

Astronomie d'observation

En astronomie d'observation, le premier ouvrage d'astronomie proprement musulman est le *Zij al-Sindh* d'Al-Khawarizmi (830). Ce livre ou *Zij*, un ensemble de tables donnant les positions successives du Soleil, de la Lune et des cinq planètes connues à l'époque, était une compilation de tables de sources indiennes avec les *Tables faciles* de Ptolémée. Il fut un ouvrage de référence dans le monde arabe et eut une influence dans l'Europe médiévale après sa traduction en latin au XII^e siècle par Adelard de Bath.

Sous l'impulsion d'Al-Ma'mūn (813-833), un grand programme d'observation des étoiles fut entrepris à Damas et Bagdad. Les mesures, obtenues grâce à de nouvelles méthodes d'observations, montrèrent un décalage entre leurs résultats et ceux de Ptolémée et conduisirent à un travail de reprise théorique de ces derniers. Parmi les auteurs ayant travaillé dans l'équipe de savants réunis par Al-Ma'mūn, on peut citer Alfraganus, Yahya Ibn Abi Mansour, Habash al Hasib, puis Al-Battani après la mort du calife, aux côtés des frères Banou Moussa, et enfin, au siècle suivant, al-Sufi, ibn Yunus et al-Biruni.

Favorisée par la construction d'instruments de grande taille et la multiplicité des observations, la mesure de l'obliquité de l'écliptique entreprise par Alfraganus, Al-Battani puis al-Khujandi, se précisa progressivement de 23° 51' pour Ptolémée à 23° 32' 19" pour al-Khujandi à la fin du X^e siècle.

Un autre problème préoccupa les premiers astronomes arabes concernant la durée de la course du soleil. Pour Ptolémée, le Soleil se déplaçait sur une orbite circulaire, dont le centre n'était pas la Terre (orbite excentrique), selon un mouvement uniforme et le temps qu'il mettait à revenir à son point de départ était constant, c'est ce qu'on appelle l'année anomalistique, l'année sidérale étant l'année qu'il met pour revenir à sa même position par rapport à une étoile fixe et l'année tropique le temps écoulé entre deux équinoxes de printemps par exemple. Ptolémée faisait coïncider l'année tropique et l'année anomalistique et l'avait fixée à 365 jours 14 h 48 min. L'année tropique et l'année sidérale sont de durées différentes à cause de la précession des étoiles fixes. Les mesures et calculs effectués par les astronomes Alfraganus, Yahya Ibn Abi Mansur¹⁴ et Al-Battani conduisirent d'une part à corriger cette constante de précession de 36 secondes d'arc par an pour Ptolémée à 49,39 secondes d'arc pour le *Livre sur l'année solaire* (première moitié du IX^e siècle) mais ils permirent aussi de mettre en évidence que l'année anomalistique correspondait, non pas à l'année tropique mais à l'année sidérale qui devint la durée de référence. Ils précisèrent en outre la durée de l'année sidérale et l'année tropique (resp. 365 jours 15h 23 min et 365 jours 14 h 32 min dans le *Livre sur l'année solaire*). Habash al Hasib étudia le problème de la visibilité du croissant de Lune, c'est-à-dire l'étude de l'instant où le croissant de Lune est visible juste avant le lever du soleil ou juste après son coucher. Al-Battani mit en évidence la variabilité du diamètre apparent du Soleil et de la Lune, ce qui le conduisit à considérer comme possibles les éclipses annulaires, remettant ainsi en cause une affirmation de Ptolémée. Ces deux siècles virent fleurir de nombreuses tables astronomiques ou *zij*. Elles reprenaient l'*Almageste* de Ptolémée, reconnaissant la valeur des méthodes géométriques employées et les modernisant à l'aide des nouvelles fonctions trigonométriques, sinus, cosinus, tangente (ou ombre) (Habash al Hasib). Elles corrigeaient les valeurs numériques des tables grâce aux nouvelles séries de mesures effectuées.

La constellation des Gémeaux d'après le Livre des étoiles fixes d'al-Sufi, qui décrit en détail environ un millier d'étoiles et donnait les premières descriptions de la Galaxie d'Andromède et du Grand Nuage de Magellan



Ainsi, entre 833 et 857, Alfraganus rédigea *Kitab fi Jawani* (« *Compendium sur la science des astres* », ou « *Éléments d'astronomie* » selon les traductions). C'était avant tout un abrégé de la cosmographie de Ptolémée, la présentant pour la première fois de manière plus descriptive que mathématique. Ce livre connut une large diffusion dans le monde musulman et eut une grande influence sur l'enseignement du système de Ptolémée. La traduction en latin par Gérard de Crémone au douzième siècle des *Éléments d'astronomie* fut à la base du célèbre ouvrage *La Sphère* de Johannes de Sacrobosco, qui connut plus de 200 éditions et servit d'ouvrage d'enseignement dans les universités européennes jusqu'au dix-septième siècle.

On peut également citer la *Table Vérifiée (Al-Zij al-Mumtahan)* d'Yahya Ibn Abi Mansour au IX^e siècle dont les valeurs numériques servirent de référence pour les astronomes ultérieurs, les *Tables de Damas (al-Zij al-dimashqi)* d'Habash al Hasib pour son utilisation des fonctions trigonométriques, les *Tables Sabeennes (al-Zij al-Sabi)* d'Al-Battani (Albatenius) (853-929) qui eut une grande influence sur l'astronomie au Moyen Âge occidental grâce à une traduction intégrale en latin dès le XII^e siècle⁵², et la *Grande Table Hakémite (al-Zij al-hakimi al-kabir)*, ouvrage monumental d'ibn Yunus (fin du X^e siècle - début du XI^e siècle) dont la précision des observations a été utilisée par les scientifiques modernes, après sa traduction au XIX^e siècle, dans l'étude de l'accélération séculaire de la Lune. Au X^e siècle, al-Sufi décrivit grâce à ses observations la position, la magnitude, la luminosité, et la couleur des étoiles, dessinant les constellations une par une dans son *Livre des étoiles fixes (Kitab suwar al-kawakib al-thabita)* (964). Ce livre très répandu en langue arabe fut traduit en latin à partir du XII^e siècle ce qui explique la consonance arabe actuelle de beaucoup de noms d'étoiles.

Astronomie théorique

Parallèlement à cette astronomie appliquée se mit également en place une astronomie théorique visant à prouver mathématiquement le modèle de Ptolémée et expliquer les résultats des observations. Les premiers outils mathématiques de cette astronomie théorique furent principalement *Les sphériques* de Ménélaos d'Alexandrie et la trigonométrie indienne ainsi que les *Éléments* d'Euclide. Un astronome mathématicien célèbre de la fin du IX^e siècle est Thābit ibn Qurra qui démontra mathématiquement que la vitesse apparente d'un astre décroît quand il s'éloigne de son périhélie si l'on suppose que son mouvement est uniforme sur son excentrique. Thābit ibn Qurra prouva également que le mouvement apparent coïncide avec le mouvement moyen si l'on considère deux points symétriques par rapport à l'axe passant par l'observateur et perpendiculaire à l'axe périhélie-apogée. Il mit en pratique ce résultat pour étudier les mouvements de la Lune et travailla également sur le problème de la visibilité du croissant de Lune.

On a aussi longtemps attribué à Thabit ibn Qurra une étude (*Liber de motu octavae sphaerae*) sur le phénomène de trépidation de la sphère céleste. L'auteur de cet ouvrage, observant les divergences entre les

mesures de Ptolémée et les nouvelles mesures, concernant les valeurs de l'obliquité et de la précession, proposait un nouveau modèle dans lequel la valeur de l'écliptique et celle de la précession variaient de manière périodique. Ce modèle eut un succès certain dans le monde arabe et principalement dans l'école andalouse et cette théorie sur l'oscillation de l'écliptique passa en Europe médiévale sous le nom d'accès et recès. Dès cette période, selon George Saliba, on s'interrogea sur la validité des modèles proposés par les Anciens. Il existe ainsi un document que l'on peut, avec une certaine vraisemblance, attribuer à l'aîné des frères Banou Moussa, démontrant mathématiquement l'inexistence d'une neuvième orbe censée expliquer le mouvement diurne des astres.

Au début du XI^e siècle, l'astronome al-Biruni fit un état des lieux des connaissances en astronomie de son époque dans son *al-Qanun al-Mas'udi (Les Tables dédiées à Mas'ud)*, exposant toutes les hypothèses et les analysant. C'est grâce à son ouvrage *Tahqiq ma li l-Hind (Enquête sur ce que possède l'Inde)* que l'on a connaissance des théories astronomiques indiennes d'Âryabhata, Brahmagupta et leurs disciples. Biruni y rapportait qu'ils considéraient que la Terre tournait autour de son axe polaire et y remarquait que cela n'entraînerait aucun problème sur le plan mathématique. Al-Biruni connaissait également le modèle héliocentrique d'Aristarque de Samos, mais il resta toute sa vie hésitant sur ce sujet, et finit par considérer l'héliocentrisme comme un problème philosophique non contradictoire avec ses propres observations du ciel. Dans son *Canon de Mas'ud*, al-Biruni rejeta finalement l'hypothèse d'une rotation de la terre autour d'elle-même pour des arguments proches de ceux de Ptolémée concernant le vol des oiseaux. Selon Régis Morelon, son ouvrage clôt cette première période de l'astronomie arabe tout en restant globalement dans le cadre qu'en avait dressé Ptolémée.

Critique du ptolémaïsme et nouvelles écoles (1025-1450)

Cette période voit l'écllosion d'une doctrine astronomique proprement musulmane. Dans la tradition grecque et celles qui la suivirent, on distinguait traditionnellement l'astronomie mathématique (dont Ptolémée est un représentant typique) de la cosmologie, branche de la philosophie (représentée par Aristote). Les savants musulmans recherchèrent une configuration physique (*hay'a*) de l'univers simultanément compatible avec les axiomes mathématiques et les principes physiques. Dans le cadre de cette *tradition hay'a*, les astronomes musulmans mirent en cause les détails techniques du système de Ptolémée en astronomie. Ces critiques, cependant, préservaient le paradigme ptolémaïque, en se confinant aux conceptions géocentriques. Comme le note en effet l'historien des sciences Abdelhamid I. Sabra : « On sait que tous les astronomes arabes, de Thābit ibn Qurra au IX^e siècle à Ibn al-Shatir (en) au XIV^e siècle, et tous les philosophes de la nature d'al-Kindi à Averroès et même après, ont accepté ce que Kuhn appelle l'« univers à deux sphères »...—les Grecs se représentent le monde comme formé de deux sphères dont l'une, la sphère céleste, faite d'un élément particulier appelé « éther », entoure la seconde, où les quatre éléments (terre, eau, air, et feu) sont confinés ».

Certains astronomes musulmans, toutefois, notamment Nasir ad-Din at-Tusi, se demandèrent si la Terre n'était pas elle-même en mouvement et recherchèrent comment rendre cette hypothèse compatible avec les calculs astronomiques et les principes cosmologiques. Plusieurs autres astronomes musulmans, et particulièrement les disciples de l'École de Maragha, mirent au point des modèles planétaires, qui, tout en restant géocentriques, divergeaient de celui de Ptolémée : ils devaient plus tard être adaptés au modèle de Copernic dans le cadre de l'héliocentrisme.

Doutes sur Ptolémée

Le modèle astronomique proposé par Ptolémée rendait compte des irrégularités du mouvement des planètes (variation de la taille apparente, rétrogradation, vitesse non constante, variations en latitude..) à l'aide d'un système complexe de déférents parfois excentriques et épicycles sur lesquels se déplaçaient les planètes à vitesse considérée parfois comme constante non par rapport au centre du cercle définissant leur trajectoire mais par rapport à un autre point (équant, prosneuse). Ce modèle mis en place comportait des erreurs relevées au siècle précédent par la série de mesures entreprises. Il était également en contradiction avec certains principes communément admis (uniformité du mouvement par rapport au centre des sphères, impossibilité du glissement du diamètre d'une sphère hors de son centre, existence dans l'espace des seuls mouvements rectilignes et circulaires à l'exclusion des mouvements d'oscillation, etc.). Ibn al-Haytham

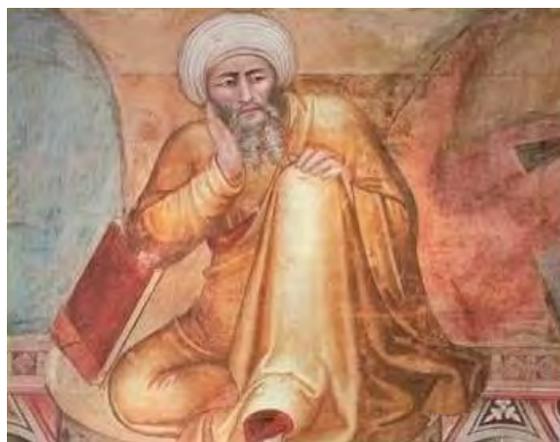
(Alhazen) entreprit donc au début de XI^e siècle une lecture critique des deux ouvrages de Ptolémée (*l'Almageste* et *Le livre des hypothèses*), y releva des contradictions internes et mit en doute la possibilité d'une réalité physique du modèle. Selon lui, le modèle de Ptolémée faisait appel à des points, lignes et cercles imaginaires incompatibles avec le monde physique : « Ptolémée fait l'hypothèse d'un ordre qui ne peut exister, et le fait que cet ordre reconstitue pour son imagination des mouvements qui sont ceux des planètes ne l'exonère pas de l'erreur qu'il a commise en faisant l'hypothèse de cet ordre; car les mouvements réels des planètes ne peuvent résulter d'un ordre qui n'existe pas ».

En 1070, Abu Ubayd al-Juzjani, un disciple d'Avicenne, proposa un modèle non-ptolémaïque dans son traité *Tarkib al-Aflak*. Dans ce livre, il formulait le problème dit de l'équant du modèle de Ptolémée, et y proposait une solution. Il affirmait qu'Avicenne avait lui-même résolu le problème de l'équant. La critique d'Alhazen *al-Shuluk 'ala Batlamiyus* (*Doutes sur Ptolémée*), le traité d'al-Juzjani *Tarkib al-aflak* (*Composition des orbites*) ainsi que l'ouvrage d'un auteur anonyme andalous *al-Istidrak 'ala Batlamiyus* (*Critique de Ptolémée*) furent pris très au sérieux par les astronomes postérieurs qui tentèrent de trouver des modèles de remplacement. Deux écoles en particulier proposèrent des alternatives au modèle de Ptolémée : l'école andalouse et l'école de Maragha.

Astronomie andalouse

Une activité astronomique se développa dans la péninsule ibérique dès le X^e siècle avec des astronomes comme Maslama al-Mayriti qui adapta les tables d'al-Khwarismi et fondateur d'une école d'astronomie à Cordoue, ainsi qu'Ibn al-Saffar (en) et Ibn al-Samh connus pour leurs études sur l'astrolabe et les cadrans solaires. Un des plus importants astronomes du XI^e siècle fut al-Zarqalluh (Arzachel) qui participa à la création des *Tables de Tolède* commencées sous la direction du qadi Saïd al-Andalusî. Dans son traité sur le *Mouvement des étoiles fixes*, que l'on connaît dans une version hébraïque, il proposa un modèle solaire fondé sur une excentrique mobile capable d'expliquer le phénomène de trépidation.

Au tournant des XI^e et XII^e siècles, des astronomes d'al-Andalus relevèrent le défi d'Alhazen, à savoir développer un modèle de sphères qui éviterait les erreurs du modèle de Ptolémée qu'il avait relevées. Comme la critique d'Alhazen, l'ouvrage anonyme andalou intitulé *al-Istidrak ala Batlamyus* (*Récapitulation de Ptolémée*) comportait une liste des objections à Ptolémée. C'est le point de départ de la controverse andalouse sur l'astronomie de Ptolémée. Les critiques et les remises en question se firent à partir de positions ptoléméennes ou aristotéliennes. Dans le premier groupe, en astronomie mathématique orthodoxe, on peut placer Jabir Ibn Aflah dont l'ouvrage *Islah al-Majisti* (*Correction de l'Almageste*) est connu en Europe grâce à la traduction en latin de Gérard de Crémone et deux traductions hébraïques. Sa partie trigonométrique est considérée comme la source du *De triangularis* de Regiomontanus. Dans cet ouvrage Jabir b. Aflah remettait notamment en question les positions des planètes inférieures par rapport au soleil. L'autre courant fut dominé par des philosophes aristotéliens comme Ibn Rushd (Averroès), Maïmonide, ibn Bajjia et Ibn Tufayl qui étaient partisans d'un respect absolu à la physique d'Aristote n'admettant que trois espèces de mouvements : centrifuges, centripètes et circulaires. La solution fut alors recherchée dans des modèles concentriques.



Averroès

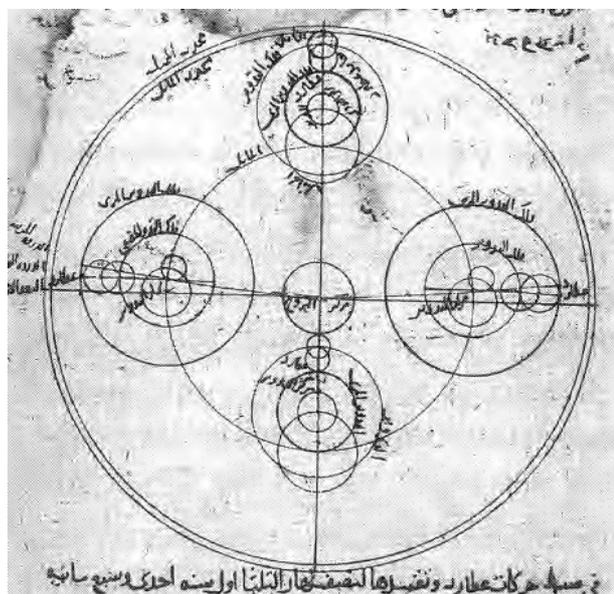
Ainsi Averroès rejetait la théorie des cercles déferents proposée en son temps par Ptolémée, tout comme il repoussait le modèle ptolémaïque : il était partisan du modèle d'univers concentrique d'Aristote. Il écrit sur le système planétaire de Ptolémée la critique suivante : « Il est contraire à la Nature de supposer l'existence d'une sphère excentrique ou d'un épicycle. [...] L'astronomie contemporaine ne nous présente aucune vérité, elle n'est conforme qu'à des calculs, non à la réalité. »

Contemporain d'Averroès, Maïmonide, écrit à propos du modèle planétaire d'Avempace (Abu Bakr) : « J'ai entendu dire qu'Abu Bakr [Avempace] avait découvert un système où il n'y a plus d'épicycles, mais il n'en a pas exclu les sphères excentriques. Ses disciples ne me l'ont pas dit; et même s'il est vrai qu'il ait découvert un tel système, il n'y a pas gagné grand-chose, car l'excentricité est tout aussi contraire aux principes posés par Aristote.... Je t'ai expliqué que ces difficultés ne concernent pas l'astronome, car il ne prétend pas enseigner les propriétés véritables des sphères, mais de simplement suggérer une théorie, exacte ou non, dans laquelle le mouvement des étoiles et des planètes est uniforme et circulaire, et en accord avec l'observation ». Selon Juan Vernet et Julio Samso, Alpetragius (Al-Bitruji) est le seul de cette école aristotélicienne à proposer un modèle homocentrique relativement abouti. Ces systèmes planétaires, cependant, furent rejetés car les prédictions des positions des planètes étaient moins précises qu'avec le modèle de Ptolémée, essentiellement parce qu'ils s'en tenaient au dogme d'Aristote de mouvement circulaire parfait.

L'École de Maragha



al-Tūsī parvint à résoudre plusieurs difficultés posées par le modèle ptolémaïque en introduisant un mouvement d'hypocycloïde, qui devait par la suite retrouver sa place dans le modèle de Copernic.



Modèle d'Ibn al-Shatir pour le mouvement de Mercure, montrant la multiplication des épicycles fondés sur l'hypocycloïde d'Al-Tusi, éliminant par ce moyen les cercles déferents et l'équant introduits précédemment par Ptolémée.

Le terme d'École de Maragha est souvent donné au mouvement de critique radicale de l'astronomie ptolémaïque dans la partie orientale du monde musulman et fait référence à l'observatoire de Maragha qui regroupa un grand nombre d'astronomes mais, selon Ahmad Dallal, ce mouvement a commencé avant l'établissement de l'observatoire et l'école de Maragha concerne une zone géographique plus large. Ce mouvement se poursuit avec l'œuvre des astronomes de Damas et de Samarcande. Comme leurs prédécesseurs d'Andalousie, les astronomes de Maragha recherchèrent des modèles alternatifs qui soient cohérents d'un point de vue mathématique aussi bien que physique et qui puissent éventuellement se passer du principe de l'équant. Les astronomes les plus éminents de l'École de Maragha du XIII^e et XIV^e siècles sont Mu'ayyad al-Din al-'Urdu (m. 1266), al-Tūsī (1201-1274), Najm al-Dīn al-Qazwīnī al-Kātibī (m. 1276), al-Shirazi (1236-1311), Sadr al-Shari'a (m. vers 1347) et Ibn al-Shatir (1304-1375).

À la différence des astronomes grecs qui se préoccupaient peu de la cohérence entre les axiomes mathématiques et les principes physiques du mouvement des planètes, les astronomes musulmans s'efforçaient d'adapter les mathématiques au monde qui les entourait en respectant les principes de la physique aristotélicienne. Cette exigence et les travaux qui en ont découlé fait que l'on a pu qualifier leurs réalisations aux XIII^e et XIV^e siècles de « Révolution Maragha », ou « Révolution de l'École de Maragha », ou encore une « Révolution scientifique antérieure à la Renaissance ». Pour construire leurs nouveaux modèles planétaires, ils utilisèrent deux résultats mathématiques. Le premier est un critère de parallélisme, le lemme d'Urdu, démontré par l'astronome Mu'ayyad al-Din al-'Urdu. Le second est le principe du couple d'Al-Tusi qui permet d'expliquer une oscillation rectiligne à l'aide de mouvements circulaires. Ce théorème révolutionne en outre la physique aristotélicienne qui distinguait les mouvements sublunaires (rectilignes) des mouvements célestes (circulaires) en montrant qu'on peut engendrer un mouvement rectiligne uniquement à partir de mouvements circulaires. Les modèles proposés par les astronomes Mu'ayyad al-Din al-'Urdu, al-Tūsī, al-Shirazi, Sadr al-Shari'a et Ibn al-Shatir, concernant les mouvements du soleil, de la lune, des planètes inférieures et des planètes supérieures, permettaient de rendre compte des mouvements des planètes sans utiliser l'artifice de l'équant ou de la prosneuse. Ces modèles présentaient parfois une meilleure adéquation avec les mesures effectuées comme le modèle solaire d'Ibn al-Shatir et rendaient parfois mieux compte des problèmes de variations en latitude.



Manuscrit médiéval de Qotb al-Din al-Shirazi représentant un modèle planétaire et ses épicycles

On retrouve dans les modèles de Copernic l'utilisation des deux outils que sont le lemme d'Urdu et le couple al-Tusi sans démonstration. Il existe également des ressemblances troublantes, hormis le fait que les modèles de Copernic sont héliocentriques contrairement à ceux de l'école de Maragha, entre les modèles de Saturne, de Mercure, et de la Lune pour Copernic et Ibn-al-Shatir. À tel point que de nombreux historiens comme Saliba et Ragep, des spécialistes de Copernic comme Swerdlow et Neugebauer sont convaincus qu'une influence existe entre l'école de Maragha et Copernic et qu'il ne reste plus qu'à trouver par quel biais. D'autres historiens, comme M. di Bono, restent plus prudents, soulignent l'absence de preuve d'une transmission directe et émettent l'hypothèse que Copernic travaillant dans la même direction, avec les mêmes objectifs que les astronomes de Maragha aurait très bien pu trouver logiquement les mêmes outils pour y parvenir. Un thème d'intenses débats à l'École de Maragha, et plus tard dans les observatoires de Samarcande et d'Istanbul, était l'éventualité de la rotation de la Terre. Al-Tusi affirma ainsi que l'observation seule ne permettait pas de déterminer si la terre était immobile ou non, contrairement à une affirmation de Ptolémée mais se résolut finalement à la considérer comme immobile en vertu d'un principe philosophique selon lequel un mouvement de la terre ne pourrait être que rectiligne et non circulaire. Un de ses disciples, Qotb al-Din Chirazi, s'intéressa également au problème. Il émit l'hypothèse que la terre en tournant pourrait aussi entraîner l'air à la même vitesse, mais pensant que des objets de poids différents

devraient avoir des vitesses différentes et n'observant rien de tel dans la réalité, se convainquit que la terre était immobile. Le travail sur les tables se poursuivit avec l'édition des *Tables ilkhaniennes* par al-Tūsī qui n'offrent cependant rien de neuf par rapport aux autres tables.

XV^e et XVI^e siècles

On considère cette période comme marquée par une stagnation : la pratique traditionnelle de l'astronomie dans le monde musulman reste soutenue, mais par comparaison aux siècles précédents et surtout le monde extérieur, l'innovation se tarit assez vite. Si pour la plupart des chercheurs il n'y a plus de progrès marquant durant cette période, quelques historiens ont récemment fait valoir que des innovations interviennent encore au XVI^e siècle et même plus tard. Quoi qu'il en soit, après le XVI^e siècle, il semble bien que l'intérêt pour l'astronomie théorique soit éteint, tandis qu'au contraire la pratique de l'astronomie d'observation selon la tradition arabe reste soutenue dans les trois empires musulmans de la poudre à canon : l'Empire ottoman, les Séfévides de Perse, et l'Empire moghol en Inde.

Le mouvement de la Terre

L'œuvre d'Ali Qushji (mort en 1474), qui vécut d'abord à Samarcande puis à Istanbul, est considérée comme un exemple de renouveau tardif de l'astronomie arabe et l'on estime qu'il a pu exercer une influence sur Nicolas Copernic du fait de la similitude d'arguments des deux auteurs sur la possibilité de la rotation de la Terre. Avant Ali Qushji, le seul astronome qui avait présenté un argument empirique en faveur de la rotation de la Terre était Nasir ad-Din at-Tusi (mort en 1274) : il s'appuyait sur le phénomène des comètes pour réfuter la thèse de Ptolémée selon laquelle on peut prouver par la seule observation que la Terre est immobile. Al-Tusi, cela dit, convenait que la Terre était immobile en se référant aux arguments de philosophie naturelle du *Traité du Ciel* d'Aristote. Au XV^e siècle, les oppositions religieuses mirent un frein à l'influence de la physique et de la philosophie naturelle. Ainsi Al-Qushji, dans son pamphlet *Sur le caractère prétendument subalterne de l'Astronomie par rapport à la Philosophie*, dénonçait la physique d'Aristote et dut séparer entièrement la philosophie de l'astronomie, pour permettre à cette dernière de s'épanouir en tant que discipline empirique et mathématique. Il put ainsi examiner les alternatives au dogme aristotélien de la Terre immobile. Il développa la thèse d'al-Tusi et conclut, se fondant davantage sur l'expérience que sur la philosophie spéculative, que la théorie d'une Terre en mouvement est tout aussi plausible que celle de la Terre immobile, et qu'il est impossible de discriminer empiriquement si l'une de ces deux thèses est vraie.

Au XVI^e siècle, le débat sur le mouvement de la Terre fut relancé par al-Birjandi (en) (mort en 1528) qui, se demandant quels phénomènes devraient accompagner la rotation de la Terre, en vient à formuler une hypothèse similaire à l'inertie de rotation de Galilée, qu'il évoque (en réponse à une objection de Qutb al-Din al-Shirazi) à propos de l'observation suivante :

« Le rocher, grand ou petit, tombe vers la Terre selon une ligne perpendiculaire au plan (*sath*) de l'horizon; l'expérience (*tajriba*) en témoigne. Et cette perpendiculaire s'écarte du point de tangence de la sphère de la Terre et du plan de l'horizon apparent (*hissi*). Ce point suit le mouvement de la Terre et c'est pourquoi il n'y a pas de différence quant au point de chute des deux rochers ».

Astronomie théorique

On pensait jusqu'à la fin du XX^e siècle que les progrès des astronomes arabes dans la théorie des planètes avaient pris fin avec l'œuvre d'Ibn al-Shatir (en) au XIV^e siècle, mais de nouvelles recherches ont mis en lumière les découvertes remarquables accomplies jusqu'au XVI^e siècle, notamment à la suite des travaux de George Saliba sur Shams al-Din al-Khafri (mort en 1550), un glossateur séfévide des écrits des astronomes de Maragha. Saliba écrit à propos d'al-Khafri : « Par sa perception claire du rôle des mathématiques dans la description des phénomènes naturels, cet astronome réussit à porter la tradition hay'a à des sommets inégalés ailleurs, au plan mathématique comme au plan astronomique. La recherche de modèles mathématiques pouvant supplanter celui de Ptolémée, et l'examen des œuvres de ses prédécesseurs tous en quête d'un modèle mathématique unifié à même de rendre compte de tous les phénomènes physiques, lui firent conclure que toute modélisation mathématique n'a pas par elle-même de sens physique, et qu'elle n'est qu'un langage parmi d'autres pour décrire la réalité physique. Il se persuada

également que les phénomènes décrits par les modèles ptoléméens n'admettent pas de solution mathématique unique soumise aux mêmes contraintes; qu'au contraire il existe plusieurs modèles mathématiques capables de rendre compte des observations de Ptolémée; qu'ils aboutissent aux mêmes prévisions sur les points critiques que Ptolémée avait retenus pour construire ses propres modèles (et qu'ainsi ils ne rendent pas mieux compte des observations que Ptolémée) tout en respectant les conditions imposées par la cosmologie aristotélicienne, admise par les auteurs de la tradition *hay'a* ». Ali al-Qushji améliora aussi le modèle planétaire d'al-Tusi et proposa une alternative au modèle de l'orbite de Mercure.

Échanges et prolongements

Chine

On fit venir en Chine sous la Dynastie Yuan des astronomes musulmans pour y perfectionner le calendrier et enrichir l'astronomie. Au cours du règne de Kubilai Khan, des Iraniens vinrent construire un observatoire et un institut d'études astronomiques à Pékin. Un astronome persan, Djamal ad-Din, offrit en 1267 à Kubilai Khan un coffret de sept instruments astronomiques, comprenant un globe et une sphère armillaire. On sait par ailleurs que plusieurs astronomes chinois travaillaient à l'observatoire de Maragha, en Perse. Selon Benno van Dalen, cependant, l'influence directe de l'astronomie arabe sur l'astronomie chinoise semble avoir été limitée.

Empire ottoman



Taqi Al-Din et des astronomes dans son observatoire - Miniature anonyme 1581

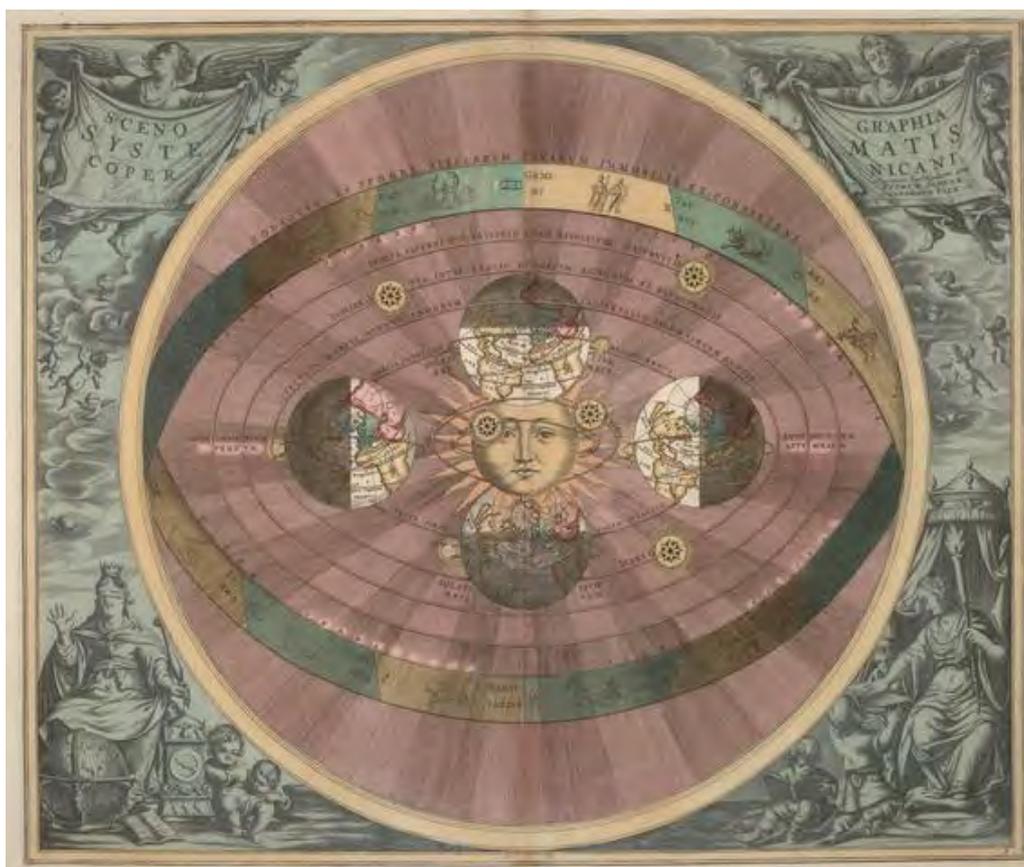
Un astronome musulman fameux du XVI^e siècle, l'Ottoman Taqi al-Din fit construire en 1577 l'observatoire d'Istanbul, où il put observer le ciel jusqu'en 1580. Il dressa des tables malheureusement incomplètes *al-Zīj al-Shāhinshāhī*, ses caractéristiques de l'orbite apparente du soleil sont plus précises que celles de Nicolas Copernic et de Tycho Brahe. Al-Din contribua aussi au développement de l'écriture en fractions décimales en l'utilisant dans ses travaux, en particulier dans ses tables trigonométriques *Kharīdat al-Durar* (ou *Perle intacte*). Il inventa aussi entre 1556 et 1580 de nombreux instruments astronomiques, parmi lesquels de très précises horloges astronomiques. À la destruction de l'observatoire d'Istanbul en 1580, l'activité astronomique stagna dans l'Empire ottoman, jusqu'à l'introduction de la Révolution copernicienne en 1660, avec la traduction par l'érudite ottoman Ibrahim Efendi al-Zigetvari Tezkireci en arabe de la *Nouvelle théorie des planètes* de Noël Duret (publiée en 1635).

Inde

L'astronomie indienne fit connaissance avec l'astronomie arabe au XI^e siècle lors de l'invasion de son territoire par le nord-ouest mais son assimilation par la culture hindoue fut lente. Ainsi le premier traité sur l'astrolabe date de 1370 écrit par Mahendra Suri. Des tables venant de l'extérieur des frontières furent recopiées en Inde. Au milieu du XVI^e siècle, l'épanouissement de l'empire Moghol attira un grand nombre

d'érudits qui apportèrent avec eux des écrits astronomiques en persan et en arabe. Des observations furent entreprises sur le sol indien mais sous une forme individuelle et désorganisée et aucun observatoire astronomique ne fut construit durant la période Moghol. On note cependant durant le règne d'Akbar puis celui de Shâh Jahân des créations de tables mettant à jour les *Tables sultaniennes* d'Ulugh Beg et l'intérêt d'Humayun pour l'astronomie était évident. On rapporte qu'il conduisait lui-même ses propres observations et envisageait la construction d'un grand observatoire. Sous son règne se développa à Lahore un grand centre de construction d'instruments (astrolabes, sphères célestes) qui perdura jusqu'au XIX^e siècle. On voit apparaître, à partir du XVII^e siècle, dans des textes en sanskrit, des termes astrologiques arabes ou persans et des éléments de tables astronomiques arabes. Après le déclin de l'Empire moghol, c'est un roi hindou, Jai Singh II d'Ambre, qui entreprit de faire renaître la tradition astronomique arabe dans son royaume. Au début du XVIII^e siècle, il fit édifier plusieurs grands observatoires dont celui de Yantra Mandir. Il y fit construire de très grands instruments d'observations en maçonnerie et en pierre, dont certains sont des innovations de Jai Singh lui-même. Son objectif principal était l'observation du Soleil et de la Lune et la mise à jour des tables sultaniennes. Dans ces observatoires, travaillaient des astronomes indiens, des astronomes arabes, mais aussi des astronomes européens jésuites. Curieux de découvrir l'astronomie européenne, Jai Singh finança même une expédition en Europe (1727-1730) mais la délégation ne lui rapporta du Portugal ni les mesures de Tycho Brahe, ni les théories de Nicolas Copernic et Isaac Newton, mais seulement des tables de Philippe de La Hire datant du siècle précédent et dans lesquelles Jai Singh remarqua quelques erreurs. Les tables qu'il produisit, dédiées à l'empereur Muhammad Shâh et connues sous le nom de *Zij-i Muhammad Shâhî*, furent utilisées pendant près de 150 ans.

Occident médiéval



Modèle héliocentrique attribué à Nicolas Copernic

L'occident médiéval prit connaissance de l'astronomie arabe par son contact avec l'Al-Andalus et la Sicile, et par le biais de traductions d'ouvrages arabes en latin et en hébreu. Dès la fin du X^e siècle, l'usage et la description des instruments arabes, et en particulier de l'astrolabe, étaient connus dans le monde occidental par les traductions de traités les concernant (Llobet de Barcelone, Gerbert d'Aurillac, Hermann le boiteux).

Une seconde vague de traduction au XII^e siècle permit de faire connaître au monde occidental les tables et l'astronomie théorique. L'Almageste fut traduit de l'arabe en latin en 1143 par Herman le Dalmate, les tables d'al-Khwarismi vers 1126 par Adélarde de Bath, celles d'al-Battani (ou Albatenius) par Robert de Chester. Mais ce sont surtout les œuvres d'al-Zarqalluh (ou Azarchel), utilisées par Raymond de Marseille avant 1141 puis traduites par Gérard de Crémone, sous le nom de *Tables de Tolède* qui eurent une grande influence sur le monde occidental jusqu'à ce qu'elles soient supplantées par les *Tables alphonsines*. Grâce à elles, le monde latin médiéval prit conscience que les tables nécessitaient de constantes corrections et que le modèle ptoléméen était imparfait. On y trouvait également un exemplaire du *Liber de Motu* attribué à Thabit ibn Qurra qui expliquait le phénomène d'oscillation des équinoxes. Un nouveau type de textes astronomiques, *Theoricae planetarum*, inspirés des œuvres d'al-Farghani (ou Alfraganus), al-Khwarismi et Thabit ibn Qurra vit le jour au XII^e et XIII^e siècles. Parmi celles-ci on peut citer la *Theorica planetarum Gerardi* et surtout la *Theorica planetarum* de Campanus de Novare qui fut étudiée dans les universités jusqu'au XIV^e siècle.

Au XIII^e siècle les traductions, par Michael Scot, des œuvres d'Ibn-Rusd (ou Averroès) ouvrirent la voie à une remise en question des fondements en astronomie. Elles mirent en évidence le rationalisme qui se dessinait dans la science arabe, ce rationalisme entra en conflit avec la pensée augustinienne et favorisa un renouveau dans les écoles de pensée dont Thomas d'Aquin et Siger de Brabant furent des représentants. Le modèle d'al-Bitruji (ou Alpetragius) fut analysé, critiqué puis rejeté au profit d'une théorie planétaire plus ptoléméenne issue d'un ouvrage attribué à Ibn al-Haytham (ou Alhazen). Soutenu par Roger Bacon, cette théorie planétaire eut de nombreux défenseurs parmi lesquels on trouve George Peurbach dont les *Theorica novae planetarum* publiées en 1454 servirent de références jusqu'à Tycho Brahe. Le grand mérite de Nicolas Copernic est d'avoir, avec son modèle héliocentrique grandement simplifié les modèles planétaires. Il prit connaissance des travaux d'al-Battani et Azarchel grâce à l'*Epitome in Almagestum Ptolemae* commencé par George Peurbach et achevé par Regiomontanus. C'est de ces écrits qu'il s'inspire pour résoudre les problèmes d'irrégularités dans le mouvement de la terre et des planètes (variation de l'excentricité, trépidation des équinoxes, variation en latitude...). Quant à l'influence que l'école de Maragha aurait eu sur ses modèles planétaires, elle est encore à l'étude. On peut dater la fin de l'influence de l'astronomie arabe sur l'occident latin à la parution du *De revolutionibus* de Copernic en 1543. Les observations de Tycho Brahe rendirent caduques toutes les tables antérieures. Toute trace du système ptoléméen disparut avec le modèle planétaire proposé par Johannes Kepler.

Les noms des étoiles

Les noms traditionnels des étoiles des langues européennes sont encore largement utilisés, bien que concurrencés par le système de désignation de Bayer. Or beaucoup de ces noms sont issus de transcriptions de l'arabe réalisées au Moyen Âge. Cependant moins du tiers d'entre eux ont pour origine la péninsule arabique, celle des autres étant grecque, ou moyen-orientale. L'origine n'est toutefois pas toujours facile à reconstituer, car ces noms ont été parfois fort mal transcrits de l'arabe vers le latin, et dans certains cas de façons divergentes. Des lettres ont pu être confondues, certains érudits comme Johann Bayer ou Joseph Scaliger n'ont parfois pas hésité à déformer les noms, pour mieux coller à une étymologie erronée qu'ils avaient cru reconstituer, et des erreurs d'attribution ont été commises. Les noms eux-mêmes peuvent faire référence à celui des constellations. Celles-ci et leur dénominations ont été transmises par les grecs mais étaient souvent d'origine beaucoup plus ancienne, héritées des sumériens et de leurs successeurs akkadiens et babyloniens. La tradition astronomique grecque comme la tradition arabe pré-islamique ont été toutes deux influencées par celle des peuples de l'ancienne mésopotamie. Aussi même s'il n'y avait aucun contact entre grecs et arabes avant la période islamique, on peut observer des rapprochements dans les noms, qui ne témoignent que de racines communes.

À côté de noms d'étoiles dont l'origine est directement gréco-latine, il est possible d'en distinguer un groupe important qui sont transcrits de l'arabe, ces noms arabes étant eux-mêmes des traductions des noms grecs de l'Almageste de Ptolémée. Les étoiles sont souvent nommées par celui-ci en référence à une partie de leur constellation, comme Deneb de *Dhanab ad-Dajājah*, la queue de la poule, terme que l'on retrouve pour plusieurs autres étoiles comme Deneb Algedi (δ Capricorni), la queue de la chèvre. On a aussi Alpheratz ou Sirrah (α Andromedae), le nombril du cheval, et bien d'autres.

Cependant d'autres étoiles ont un nom dont l'origine arabe précède les traductions de Ptolémée et l'influence grecque, ainsi Véga, *al-nasr al-wāqi* (l'aigle ou le vautour) plongeant, Altaïr *al-nasr al-ta'ir*, (l'aigle ou le vautour) en vol, Aldébaran, le suiveur (des Pléiades), Bételgeuse, à l'origine *yad al-jawzā*, la main d'Orion, et dont la mauvaise transcription (un b pour un y) est renforcée par une reconstruction étymologique inventée par Scaliger, et là aussi bien d'autres.

Vous trouverez, en annexe I un tableau montrant que les 2/3 des étoiles les plus brillantes de notre ciel et visibles par les astronomes arabes des IX^e au XVI^e siècles portent encore leurs noms d'origine arabo-persiques.

Observatoires

L'observation des étoiles dans le monde arabe médiéval a pris plusieurs formes. Certaines étaient le fait d'individus dotés de quelques instruments, on parle alors d'observatoires privés. D'autres étaient effectuées dans le cadre d'un programme d'étude, financé par un prince et comportaient une équipe et un directeur. Une telle structure est, selon Aydin Sayill, un produit de la culture islamique. Les observations s'effectuaient à l'œil nu et les instruments utilisés dans les premiers temps étaient semblables à ceux de Ptolémée, elles ne nécessitaient donc pas de construction en dur. Progressivement, la taille des instruments augmentant, la nécessité de construire des bâtiments spécifiques s'est fait sentir.

Premiers observatoires

Les observations astronomiques ont commencé dès le VIII^e siècle puisque Ibn Yunus rapporte l'existence de telles observations à Gundishapur avant 790 mais le premier programme d'observations est celui financé par le calife Al-Ma'mūn à la fin de son règne (vers 830). Elles furent effectuées à Bagdad dans le quartier de Shammāsiyya et au mont Qāsiyūn près de Damas. On sait peu de chose sur ces deux observatoires sauf qu'ils possédaient des directeurs de recherche, une équipe d'astronomes et qu'ils utilisaient des instruments de grande taille. Il n'y a aucune mention de construction de bâtiments spécifiques.

Au X^e siècle, la dynastie des Bouyides encouragea de grands projets, utilisant des appareils de grandes tailles nécessitant la construction de bâtiments en dur à Rayy sous le règne de Fahkr al-Dawla où al-Khujandi réalisa un grand sextant pour des observations solaires, à Ispahan où al-Sufi observa les étoiles fixes, à Bagdad, dans le palais royal de Charaf ad-Dawla Chirzil où les astronomes al-Quhi et Abu l-Wafa entreprirent un programme d'observations des étoiles. On se trouve ici en présence des trois composantes : bâtiments, programme, équipe.

Au XI^e siècle, Malik Shah I^{er} institua un grand observatoire, sans doute à Ispahan qui fonctionna durant 18 ans. C'est là qu'Omar Khayyam et ses collaborateurs construisirent leurs tables et promulguèrent le Calendrier solaire persan, également appelé *calendrier jalali*. Parallèlement à ces observations institutionnelles les observations privées furent également très nombreuses à Bagdad, Damas, Samarra, Nishapur, Raqqa, où Al-Battani observa les étoiles pendant trente ans et au Caire (Ibn Yunus). En Occident musulman, il n'y a pas trace de programme d'observations suivies, seuls semblent exister des observatoires privés (al-Majriti et Al-Zarqalluh), et il semble que la tour Giralda de Séville ait été utilisée.

Observatoires de la fin du Moyen Âge

Les observatoires les plus réputés, cependant, ne furent établis qu'à partir du début du XIII^e siècle. En 1259, Houlagou Khan finança la construction de l'observatoire de Maragha (au Nord-Ouest de l'Iran actuel) et al-Tusi en fut le premier directeur. Cet observatoire bénéficiait de revenus propres pour son entretien et survécut ainsi à la mort d'Houlagou Khan. Outre les bâtiments d'observations et les divers instruments, il comportait une grande bibliothèque et une fonderie pour les instruments en cuivre. Certains des meilleurs astronomes de l'époque s'y sont rendus, et leur collaboration a débouché pendant 50 ans sur d'importantes modifications successives au modèle de Ptolémée. Les observations d'al-Tusi et de son équipe ont été rassemblées par écrit dans les tables intitulées *Zij-i Ilkhani*. On a trace de son activité jusqu'en 1316. Il servit de modèle pour les grands observatoires ultérieurs. Parmi-ceux-ci on compte le grand observatoire de Samarcande construit en 1420 par le prince Ulugh Beg, lui-même astronome et mathématicien, où travailla Al-Kachi, le grand observatoire d'Istanbul construit par Taqi al-Din en 1577 et les observatoires du prince Jai Singh II en Inde au XVII^e siècle dont le Yantra Mandir.



Al-Tusi à l'observatoire de Maragha.

Instruments

Dépouvu de télescope, les astronomes arabes n'étaient guère en position d'enrichir les connaissances des Anciens de découvertes significatives. Malgré la traduction en arabe de l'Âryabhata, qui présente un système mathématique dans lequel on considère le mouvement des planètes par rapport au Soleil, on ignora généralement l'héliocentrisme, les discussions, corrections ou améliorations du système de Ptolémée se limitant à des points de détail. En raison du temps considérable qui s'était écoulé depuis la publication de ces tables, des erreurs s'étaient accumulées. Le divorce entre les modèles cosmiques des Grecs et les observations n'étaient que trop évidentes pour les érudits arabes. Au XVI^e siècle, alors que l'Europe voyait éclore la révolution copernicienne, les érudits arabes se détournaient de plus en plus des doctrines de l'Antiquité. On ignore dans quelle mesure ces deux voies étaient indépendantes l'une de l'autre, ou si Copernic fut en contact, indirectement, avec les idées arabes. Plusieurs progrès des astronomes arabes demeurèrent sans lendemain, comme l'observatoire astronomique de Samarcande construit sur ordre d'Ulugh Beg au début du XV^e siècle. Institution la plus moderne de son temps, elle était déjà détruite une génération seulement après le règne d'Ulugh Beg et fut dès lors abandonnée à la ruine. D'autres observatoires connurent un destin analogue; seul l'observatoire de Maragha édifié en 1264 par Nasir ad-Din at-Tusi survécut près de 14 ans à son fondateur, avant de fermer ses portes entre 1304 et 1316. Bien que les astronomes arabes eussent reconnu les errements des théories de l'Antiquité et cherchassent à les améliorer, leur apport essentiel consiste, rétrospectivement, dans la conservation, la traduction et parfois la généralisation des connaissances des Anciens, ce que la culture européenne du Haut Moyen Âge n'a pas été capable de faire. Avec la fin de l'Âge d'or de la civilisation arabo-musulmane au XV^e siècle l'astronomie arabe n'était plus en mesure de communiquer aucun élan à l'astronomie occidentale. Ses résultats, rendus désuets par la Renaissance européenne, sombrèrent dans l'oubli. Le développement de l'astronomie arabe est aussi exemplaire pour l'astronomie d'autres civilisations ayant atteint un niveau de développement semblable, mais qui n'ont pu (faute de lunette astronomique) se développer : c'est particulièrement le cas des astronomies indienne ou védique, chinoise et précolombienne. Toutes ces cultures disposaient du savoir accumulé par plusieurs siècles d'observation, leur permettant de prédire les phénomènes périodiques du système solaire.

Le matériel astronomique utilisé par le monde arabe médiéval est pour la plupart issu de l'astronomie grecque dans laquelle on trouve des références à la sphère armillaire, les anneaux équinoxiaux ou méridiens, les règles parallactiques, le quadrant mural, la sphère céleste, les cadrans solaires, les équatoires. Le monde musulman en prit connaissance par le biais de traités mais aussi probablement par une tradition de facteurs d'instruments. Nos connaissances sur les instruments utilisés ou fabriqués par les astronomes musulmans du Moyen Âge nous viennent essentiellement de deux sources : d'une part les instruments conservés dans les collections privées et des musées, d'autre part les copies de traités et les manuscrits du Moyen Âge parvenus jusqu'à nous. Les musulmans tout en perfectionnant les instruments des Grecs et Chaldéens en y adjoignant de nouvelles échelles, inventèrent un arsenal de variations sur ces outils d'observation. Beaucoup de ces instruments ont été imaginés ou construits pour les besoins du culte, comme la détermination de la qibla (direction de La Mecque) ou de l'heure des Salah, ou pour celui de l'astrologie.

Astrolabes

L'astrolabe est l'instrument emblématique de l'astronomie arabe. Son nom *asturlab* est une arabisation du mot grec *astrolabon*, ce qui rappelle l'origine grecque de cet instrument mais c'est le monde arabe médiéval qui en popularisa l'usage tout en le modernisant. Le plus ancien astrolabe encore présent au XXI^e siècle date de la fin du VIII^e siècle ou début IX^e siècle mais les chroniques arabes attribuent à al-Fazari la construction des premiers astrolabes du monde musulman et signalent que ces premiers instruments furent fabriqués dans la ville de Harran avant que la construction ne s'en répandit dans tout le monde musulman. Fabriqués pour la plupart en laiton, ils demandaient un travail d'artisans-experts et coûtaient relativement cher. Être capable de fabriquer de tels instruments procurait un tel prestige que ces artisans ajoutaient parfois à leur nom le surnom de *al-Asturlabi* (facteur d'astrolabes). Cet instrument, fondé sur le principe de la projection de la sphère céleste et de la course du soleil, permettait entre autres choses, de déterminer l'heure locale grâce à la mesure de la hauteur d'un astre, de mesurer la hauteur d'un bâtiment, déterminer l'heure du lever ou du coucher des astres, etc. Il en exista une grande variété. L'astrolabe planisphérique simple ne pouvait être utilisé qu'à une latitude déterminée. L'adjonction de plaques ou tympan supplémentaires permettait un usage dans d'autres latitudes. Le revers de l'astrolabe était utilisé pour présenter d'autres outils (quadrant à sinus, indicateur de Qibla, carré à ombres, calendrier solaire et lunaire, équatoire...). On pouvait y faire figurer les heures des prières, des renseignements astrologiques, la mère (sous les tympan) pouvait aussi comporter des informations comme la longitude et la latitude d'un certain nombre de villes. L'astrolabe universel pouvait être utilisé à plusieurs latitudes. Il demandait que les projections se fassent sur un plan spécial. Le principe semble apparaître pour la première fois dans un traité d'al-Biruni mais ce sont deux astronomes de Tolède, Ali Ibn Khalaf et al-Zarqalluh (Azarchel) qui sont les créateurs des premiers modèles au XI^e siècle. Ibn Khalaf est le créateur de l'instrument connu dans l'Occident latin sous le nom de « *Lamina* universelle » et al-Zarqalluh le créateur d'instruments connus sous le nom latin de « *Saphae* » (*Safiha shakkaziyya* ou *Safiha al-zarqalliyya*).

L'astrolabe sphérique semble être une invention arabe mais aurait eu plus un rôle d'objet de démonstration que d'objet utilitaire. Il était connu dans le monde arabe au moins dès le X^e siècle. Il existait en outre une grande tradition de recherche et d'invention concernant les astrolabes. Beaucoup d'entre eux ne figurent que dans des traités et ne semblent pas avoir donné lieu à une fabrication ou du moins leur usage fut très limité. On peut citer ainsi l'astrolabe «melon» qui correspond à une projection passant par un pôle, l'astrolabe créé selon une projection orthogonale, l'astrolabe construit sur le principe que la terre tourne sur elle-même, imaginé, selon al-Biruni, par Al-Sijzi, l'astrolabe linéaire ou bâton d'al-Tusi.

Quadrants

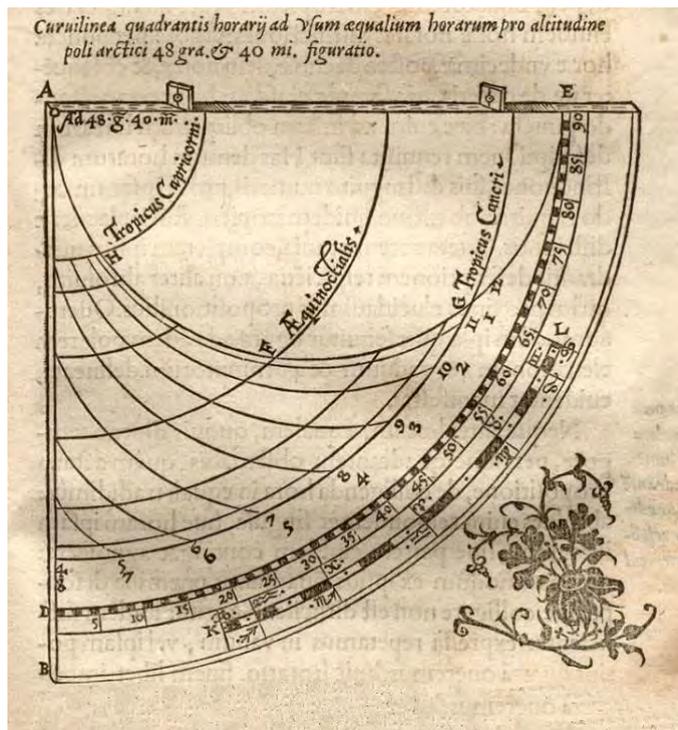
On regroupe sous ce vocable un grand nombre d'instruments en forme de quart de cercle. À côté du quadrant mural de l'astronomie grecque, on trouve de nombreux instruments portatifs mis au point par le monde arabe.

Le quadrant simple est un instrument de visée permettant de déterminer la hauteur d'un astre : lorsque le bord du quadrant est aligné avec l'astre, le fil à plomb permet de déterminer sa hauteur. Sur la plaque du quart de cercle, on peut graver un système de lignes qui transforme l'instrument en nomogramme. Le quadrant à sinus possède une plaque gravée de lignes trigonométriques (quadrillage permettant de lire

facilement le sinus et le cosinus d'une série d'angles). Il apparaît au début du IX^e siècle et son invention est attribuée à al-Khwarismi. Il permet de résoudre des problèmes trigonométriques tel que la recherche de la Qibla. Le quadrant horaire simple possède un système de lignes gravées permettant de déterminer l'heure saisonnière ou l'heure régulière à une latitude donnée en fonction de la hauteur du soleil. Une manipulation sur le fil à plomb permettait de tenir compte de la date d'observation. Cet instrument, fondé sur des propriétés trigonométriques, est une invention du début du IX^e siècle à Bagdad. Le quadrant horaire universel permet de déterminer l'heure saisonnière à toute latitude. On trouve, dans un manuscrit du IX^e siècle, la description d'un quadrant universel à curseur qui serait l'ancêtre du *quadrans vetus* latin. Le quadrant-astrolabe possède une projection stéréographique des cercles d'égale hauteur (almicantarats). L'origine de ces quadrants est obscure mais on en trouve mention dans un manuscrit du XII^e siècle. Ces quadrants-astrolabes de fabrication facile (on en trouvait en bois recouvert de papier) furent très populaires à partir du XIV^e siècle et tendirent à remplacer l'astrolabe dans la plus grande partie du monde arabe à partir du XVI^e siècle.



Astrolabe sphérique (1480-81) - Musée d'Oxford



Quadrant horaire à heures égales

Sphères armillaires et sphères célestes

Ce sont des mécanismes sphériques analogiques permettant de déterminer la position des étoiles et du soleil selon les époques de l'année. Elles servaient aussi à résoudre des problèmes d'astronomie sphérique. Pour servir dans le cadre d'observations astronomiques, il fallait qu'elles soient de grande taille. David King signale ainsi la description d'une sphère armillaire tellement grande qu'un cavalier à cheval pouvait passer au travers. Les sphères célestes de petite taille servaient plus de guide pour l'identification des étoiles et étaient utilisées en association avec un traité sur les étoiles. Le livre sur les étoiles fixes d'al-Sufi (965) présente ainsi les constellations sous deux aspects symétriques, vues du ciel et vues sur une sphère céleste. Il est rapporté que ce livre aurait été associé à un globe céleste en argent de grande taille destiné à Adhud ad-Dawla. Les sphères célestes étaient construites en métal (or, argent, cuivre, laiton), en pierre, cuivre, ou bois couvert de parchemin, mais la plupart de celles qui sont parvenues au XX^e siècle sont en laiton. La plus ancienne date de 1085 et mesure 21 cm de diamètre.

Équatoires

Un équatoire est un système géométrique et mécanique permettant de reproduire le mouvement du soleil et de la lune ou des planètes selon le système de Ptolémée. Avant Ptolémée, de tels instruments existaient déjà, fondés sur les systèmes de l'époque : on sait qu'Archimède possédait un équatoire et l'on peut classer la machine d'Anticythère parmi les instruments du monde grec de cette sorte de haute complexité. Dans le

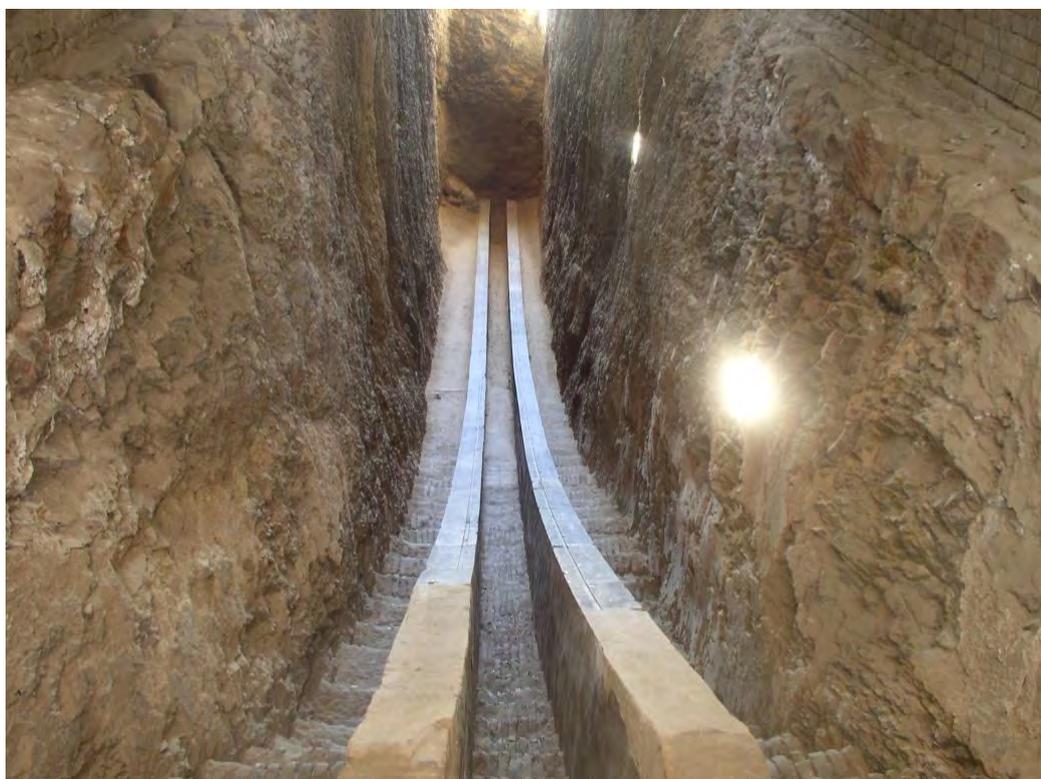
monde arabe également, ce type d'instruments fut étudié : on connaît au moins 4 traités sur ce sujet dont le plus ancien date du XI^e siècle. Il ne reste pas d'instrument de ce type ayant survécu mais on sait qu'al-Biruni a décrit un calendrier solaire-lunaire selon ce principe. On trouve également mention d'un équatoire dans les écrits d'al-Kashi. Dans l'Occident arabe, il est fait mention de deux mécanismes de cette sorte, l'un « les plaques de 7 planètes » est une conception d'Ibn al-Samh et l'autre, à deux plaques, est conçu par al-Zarqalluh.

Cadrans solaires

Les musulmans apportèrent des contributions significatives à la théorie et la fabrication des cadrans solaires, dont le principe leur venait de leurs prédécesseurs indiens et grecs. On attribue à Al-Khawarizmi des tables qui abrégèrent et facilitèrent considérablement la fabrication de ces instruments permettant ainsi leur construction n'importe où sur Terre. On en plaçait fréquemment au fronton des mosquées pour vérifier l'heure de la prière. L'un des plus beaux spécimens fut fabriqué au XIV^e siècle par le *muwaqqit* (grand horloger) de la mosquée omeyyade de Damas, Ibn al-Shatir. Les astronomes et ingénieurs musulmans couchèrent par écrit des instructions sur la construction de cadrans solaires tant horizontaux que verticaux ou polaires. Les premiers cadrans solaires indiquaient majoritairement l'heure saisonnière. Il faut attendre le XIV^e siècle et le cadran solaire d'Ibn al-Shatir pour voir apparaître un cadran solaire dont le gnomon est parallèle au pôle, ce qui permet de donner les heures régulières à n'importe quelle latitude. Il a également existé, dès le XIV^e siècle des cadrans solaires portatifs inclus dans des nécessaires astronomiques ou instruments astronomiques à usages multiples installé dans une boîte à couvercle. Il s'agissait pour le nécessaire astronomique d'Ibn al-Shatir d'un cadran solaire polaire et pour celui d'al-Wafa d'un cercle équatorial.

Horloges astronomiques et astrolabes à engrenages

L'astronomie musulmane bénéficia de la compétence technique des horlogers arabes pour la construction d'horloges astronomiques à eau. On trouve ainsi des témoignages du XIV^e siècle décrivant des horloges astronomiques de grande complexité. Al-Biruni décrit ainsi un calendrier mécanique, on a trace de l'existence d'une horloge astronomique sur la mosquée de Fez. Il est rapporté qu'Ibn al-Shatir possédait un astrolabe à engrenage. Il existe également un astrolabe complété par un calendrier lune-soleil mu par engrenages, œuvre du XIII^e siècle.



Sextant mural d'Ulugh Beg, édifié à Samarcande, Ouzbékistan, au XV^e siècle

Instruments d'observation

Les instruments présents dans les observatoires astronomiques sont les instruments grecs précédemment cités : sphère armillaire, anneaux équinoxiaux ou méridiens, règles parallactiques, quadrant mural. Pour améliorer leur performance les astronomes arabes en augmentèrent la taille et les perfectionnèrent. Ainsi Ibn Sina a décrit un instrument de visée, avec un système de double mesure, d'un diamètre de 7 mètres, utilisé au X^e siècle. Al-Battani utilisa des tubes d'observations permettant de fixer son regard sans être dérangé par la luminosité ambiante. Ces tubes sont décrits par al-Biruni comme des tubes de 5 coudées de long mais ils étaient dépourvus de tout système optique. L'observatoire de Rayy possédait un sextant (sixième de cercle) d'un rayon de 20 mètres avec un système de visée selon le principe de la chambre noire : entièrement dans l'obscurité, il possédait une petite ouverture sur le toit permettant à un rayon de soleil de passer. Au XV^e siècle, Ulugh Beg fit construire un « Sextant de Fakhri », d'un rayon d'à peu près 40 m. Il se dressait à Samarcande, en Ouzbékistan, et cet arc édifié avec beaucoup de soin comportait des escaliers de chaque côté pour permettre aux assistants chargés des mesures de se déplacer rapidement. Les instruments de l'observatoire de Maragha sont décrits par al-'Urdu, ils sont de même type que ceux déjà cités à l'exception d'un cercle azimutal pourvu de deux quadrants permettant de prendre simultanément la hauteur de deux étoiles.

C) Les échanges entre les civilisations musulmane et occidentale

Grâce aux échanges culturels avec le monde musulman, surtout après la création des royaumes latins d'Orient au XII^e siècle et la Reconquista en péninsule Ibérique, les œuvres d'Aristote et de Ptolémée finirent par être connues de l'Occident via leurs traductions arabes, à leur tour traduites en latin, notamment par Gérard de Crémone. Les différents systèmes du monde, tels qu'on les découvrit alors dans les écrits d'Aristote et de Ptolémée, ou même dans les écrits d'Al-Farghani, firent l'objet d'innombrables gloses et de débats sur le nombre exact de sphères célestes ou sur la rotation relative de la Terre et de la sphère des fixes. La préférence marquée, dès le début du Moyen Âge, pour les spéculations métaphysico-théologiques sur le cosmos ordonné au détriment de l'observation du ciel, incitait naturellement les astronomes d'Europe à suivre d'abord cette direction. On ne remettait cependant toujours pas en cause les principes de la cosmologie des sphères, qui est un mélange des conceptions d'Aristote et de Ptolémée.

Le regain d'intérêt pour l'astronomie constitue donc un aspect significatif de la Renaissance du XII^e siècle. La naissance des universités : l'université de Bologne (1158), d'Oxford (1167), de Padoue (1222), la Sorbonne (1253), et l'université de Cambridge (1284) remet l'astronomie à l'honneur, particulièrement dans les facultés de médecine (les horoscopes et la théorie des climats reçoivent en effet une certaine autorité en vertu de la théorie des humeurs et des correspondances). Centrés au départ sur un commentaire du « De Cælo » d'Aristote, les cours d'astronomie s'étoffent pour s'ouvrir sur les éléments de géométrie de la sphère, et la théorie des épicycles présente dans l'œuvre de Ptolémée, mais faussement attribuée à celui-ci. Dans certaines universités, des cours de spécialité viennent en complément du cours d'astronomie du quadrivium : les *théoriques*, les *habitations*, les *Climats* et l'*Astrologie*. Ces deux derniers étaient essentiellement utiles aux médecins.

- Le terme de *theoricæ* désigne un cours sur les modèles géométriques des mouvements des planètes. Le nom dérive d'un ouvrage attribué à Cléomède.
- Le terme latin d'*Habitationes* est consacré aux phénomènes célestes perceptibles pour les habitants de différents lieux de la Terre, et particulièrement les différences de durée du jour et de la nuit.

Un professeur de la Sorbonne, Joannes de Sacrobosco, compose avec le *De sphaera mundi* (vers 1230) le traité d'astronomie le plus diffusé du Moyen Âge. Il expose dans d'autres traités les principes de la numération de position arabe et le calcul du comput. La promotion de la numération de position, héritée des commerçants levantins et des savants arabes, facilite l'introduction des tables numériques, particulièrement des tables de trigonométrie.

Le roi Alphonse X de Castille ordonne aux plus grands astronomes de son royaume la construction de nouvelles tables astronomiques à partir du système de Ptolémée (« tables alphonsines ») : ce travail

gigantesque sera achevé en 1252. Elles contiennent nombre d'informations sur le mouvement des astres mais sont encore influencées en grande partie par des idées religieuses. Roger Bacon (1214–1292 ou 1294), s'inspirant d'Aristote, construisit les premiers instruments pour observer directement le Soleil dont une chambre noire et donna dès 1267 la description correcte du polissage d'une lentille.

Puis au XV^e siècle, le jeune astronome Regiomontanus publie ses propres traités, comme son *Calendarium*, qui est pour l'époque une espèce de *best-seller*. En 1471, il fonde l'observatoire de Nuremberg. En 1472, il réalisa la première mesure du diamètre angulaire d'une comète (à peu près au moment où l'on érigeait, dans l'Empire aztèque, le calendrier appelé « Pierre du Soleil »). Regiomontanus se démarque de la stricte obédience à la tradition des Anciens. Ses propres observations, et leur comparaison avec les données des Anciens doivent, selon lui, régénérer et aider l'astronomie à trouver « la Vérité ». Cette attitude fait de lui, aux côtés de Nicolas de Cues, l'un des pionniers de la représentation copernicienne du monde.

IV La Renaissance (XV^e - XVI^e siècles)

L'héliocentrisme commence à concurrencer le géocentrisme dans la communauté scientifique

A partir de ce chapitre nous allons, tout en restant sur la trame d'un fil chronologique (généralement par siècle), nous attarder plus particulièrement sur les individus. Les travaux astronomiques ne sont plus désormais générés par des groupes ou écoles de pensée, portés par une civilisation ou une religion. Les travaux et les découvertes seront, à partir de la Renaissance, le fruit de quelques astronomes remarquables et/ou visionnaires. C'est une sorte d'individualisation de l'astronomie. Donc, au fil du temps, nous nous attarderons sur les noms et dates des acteurs majeurs de l'astronomie. Nous avons fait un choix et, ne pouvant pas les citer tous, nous avons arbitrairement décidé de vous présenter ceux que nous considérons comme étant les plus importants.

Quelques décennies avant la chute de Constantinople (1453), des érudits byzantins commencèrent à émigrer vers Venise et les principautés italiennes, emportant avec eux quantité de manuscrits grecs. Avec les débuts de l'imprimerie, les grandes œuvres astronomiques connurent une diffusion nouvelle. L'approche humaniste des textes de l'Antiquité favorisait une lecture critique et rendait possible l'expression d'idées nouvelles, voire opposées aux doctrines des Anciens. La Renaissance marque l'apogée de l'astronomie classique en tant que *système géométrique du monde*, doctrine qui toutefois ne s'intéressait qu'aux causes physiques du mouvement des astres. Si, jusqu'au milieu de la Renaissance, astrologie et astronomie ne s'opposaient pas encore, elles ne se confondaient certainement déjà plus : l'astronomie classique ne se consacre qu'aux positions des étoiles et des planètes et à leur calcul, alors que l'astrologie s'intéresse à l'interprétation des positions relatives des astres pour les événements terrestres. En ce sens, en dehors du comput pascal, les connaissances astronomiques ne constituaient qu'une technique auxiliaire de l'astrologie. Jusqu'au XVII^e siècle, plusieurs astronomes continuaient de tirer des horoscopes pour leurs protecteurs princiers, mais n'y voyaient plus leur activité principale. De 1519 à 1522, Fernand de Magellan accomplit le premier voyage autour du monde, découvrant au passage le Détroit de Magellan, les îles Philippines, les Nuages de Magellan dans le ciel austral et la ligne de changement de date.

L'astronomie européenne, présente dans les universités européennes au XII^e siècle, ne reprend vraiment son élan qu'après 1500 avec les travaux de Nicolas Copernic qui s'est instruit lors d'un séjour de 8 ans dans les grandes universités italiennes. Il en revient en 1508, déjà connu comme astronome. Ses observations de la Lune se détachant sur le fond du ciel étoilé le font douter du système géocentrique et l'amènent à concevoir un système où le Soleil serait le centre du cosmos; mais il est mourant lorsqu'en mai 1543 son livre esquissé dès 1531 « *De revolutionibus orbium coelestium* » paraît à Nuremberg. Dans ce traité, Copernic démontre mathématiquement qu'outre le mouvement des planètes, les phénomènes célestes sont tous correctement décrits avec un modèle héliocentrique (certains savants grecs de l'Antiquité avaient en effet déjà établi la compatibilité du mouvement des seules planètes avec l'héliocentrisme). Sa théorie va révolutionner les sciences et offrir aux philosophes une autre idée de la place de l'homme dans le cosmos, dans le cadre de la Renaissance.

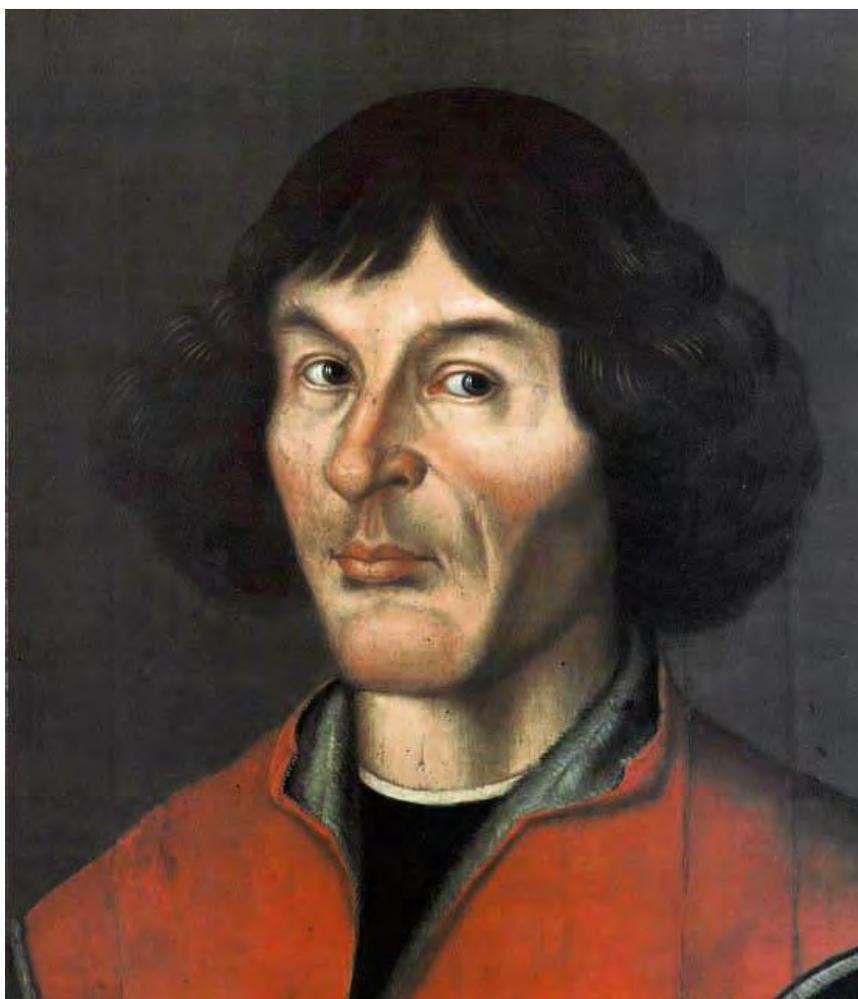
A) Nicolas Copernic (1473-1543)

Chanoine, médecin et astronome polonais. Jeune, il étudie les mathématiques, l'astronomie, mais aussi la médecine et le droit. Il part plusieurs années en Italie où il apprend le grec et le droit canon à Bologne où il loge chez un astronome.

Il se convainc rapidement de la nécessité d'abandonner le modèle d'Univers de Ptolémée au profit d'un système héliocentrique. C'est ainsi qu'il écrit, dès les années 1511-1513, *De Hypothesibus Motuum Coelestium a se Constitutis Commentariolus* (connu sous le titre de *Commentariolus*), un court traité qui expose le système héliocentrique et qu'il fait circuler, sous forme manuscrite, auprès de ses amis. C'est à la

même période que Copernic, dont les compétences astronomiques sont visiblement reconnues, est sollicité dans le cadre du V^e concile du Latran sur la réforme du calendrier. Il écrit plus tard son œuvre principale *De Revolutionibus Orbium Coelestium, Des révolutions des sphères célestes*, achevé vers 1530. Cette œuvre magistrale ne sera publiée que le 24 mai 1543, peu de temps avant sa mort, probablement en raison de la crainte qu'il avait des probables réactions de l'Église. En effet, celle-ci voyait d'un très mauvais œil que l'on mette en doute le principe fondamental du dogme du géocentrisme de Ptolémée. Nous verrons qu'il n'avait peut-être pas tort quand nous parlerons de Giordano Bruno.

Pour justifier cette remise en cause totale, Copernic met en exergue les défaillances des systèmes astronomiques existants : tout d'abord, leur multiplicité, d'Eudoxe à Ptolémée en passant par les nombreux aménagements opérés aux théories de ce dernier par les astronomes qui lui ont succédé. Ensuite, leur incapacité à décrire avec précision les phénomènes observés. Enfin, le manque d'ordre et d'harmonie dans ces systèmes extrêmement complexes. Concernant la théorie de Ptolémée, il ajoute une sévère critique de l'astucieuse invention de ce dernier, **l'équant**, qui viole le principe de l'uniformité des mouvements circulaires par rapport à leur centre, ce qui la rend irréaliste aux yeux de Copernic. Il propose en réponse à ces insuffisances un système reposant sur quelques axiomes révolutionnaires (présentés dès le *Commentariolus*), et étayé par une démonstration mathématique minutieuse (exposée dans le *De Revolutionibus*).



Nicolas Copernic, promoteur de l'héliocentrisme moderne.

Axiomes du système héliocentrique

Ayant disposé le Soleil au centre de l'Univers, il dote donc la Terre de deux mouvements principaux : sa rotation (la Terre tourne sur elle-même et fait un tour sur son axe en une journée) explique dans un premier temps le mouvement diurne de la sphère céleste en un jour, la sphère des étoiles demeurant immobile; sa révolution annuelle autour du Soleil fait de la Terre une planète, toutes les planètes tournant autour du

Soleil. La Terre n'est plus que le centre des mouvements de la Lune. Pour Copernic, « le mouvement de la terre seule suffit donc à expliquer un nombre considérable d'irrégularités apparentes dans le ciel », notamment le mouvement rétrograde des planètes, phénomène qui n'était expliqué qu'à grand-peine par les systèmes géocentriques. Pour justifier que l'on ne perçoive pas les effets de la révolution annuelle de la Terre par un effet de parallaxe sur les étoiles, Copernic postule enfin que la sphère des étoiles se situe à une distance considérable, bien plus importante que ce que l'on imaginait jusqu'alors.

Avantages du système copernicien

Pour son auteur, la grande force de ce système héliocentrique est qu'il introduit ordre et harmonie dans le cosmos. Il y a en particulier une corrélation logique entre les distances des planètes au centre du système et leur période de révolution. En effet, plus l'orbite d'une planète est grande, plus il lui faudra de temps pour faire une révolution complète autour du Soleil (ce qui n'était pas le cas pour Mercure et Vénus dans le système de Ptolémée, ces deux planètes ayant la même période de révolution que le Soleil). Copernic n'a plus besoin des monstrueux épicycles des planètes que Ptolémée avait introduits pour expliquer leurs rétrogradations. Il élimine également l'incroyable coïncidence qui donnait par exemple à Mars, Jupiter et Saturne la même période d'un an sur ces épicycles (de tailles pourtant inégales). Sa théorie explique en outre pourquoi les planètes internes, Vénus et Mercure, ne s'écartent jamais beaucoup du Soleil (et ne se retrouvent jamais en opposition par rapport à lui).

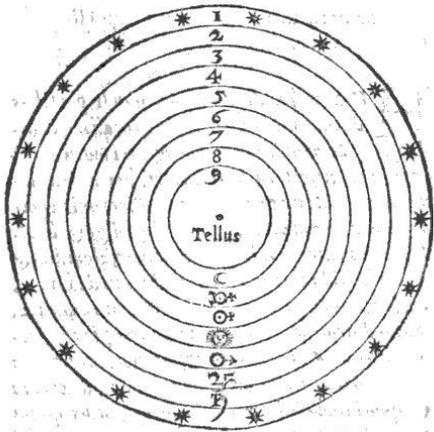
Le système de Copernic permet même de mesurer les distances de chaque planète au Soleil, ce qui était impossible dans un système géocentrique. C'est ce qui permettra plus tard à Johannes Kepler de calculer les trajectoires de ces astres, et d'établir les lois du mouvement dans le Système solaire, lois sur lesquelles Isaac Newton s'appuiera pour élaborer sa théorie de la gravité.

Univers de Copernic : plus simple et moderne que celui de Ptolémée ?

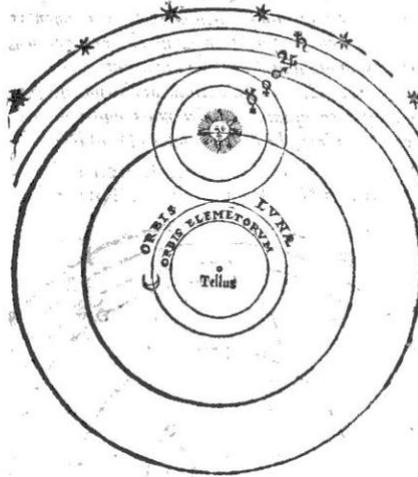
Malgré la modernité révolutionnaire de son système, Copernic conserve toutefois certains éléments archaïques des anciens systèmes du monde : ainsi l'idée aristotélicienne (pourtant abandonnée par Ptolémée et même probablement déjà par Hipparque) des sphères solides, ou encore la *sphère des fixes*, contenant les étoiles et marquant la limite d'un univers fini.

On oppose souvent la complexité du système de Ptolémée et de leurs dérivés à la simplicité du système de Copernic. En effet, le premier comporte une multitude de cercles (excentriques et épicycles), tandis que la représentation classique du second ne montre que les six cercles des planètes et celui de la Lune (voir l'illustration). Et il est vrai, comme Copernic nous le dit, que son modèle a permis de supprimer les énormes cercles disgracieux (épicycles ou excentriques) destinés à justifier les inégalités des mouvements des astres (rétrogradations). Cependant, ce schéma du système héliocentrique est trompeur, car extrêmement simplifié. En effet, Copernic considère que le mouvement circulaire uniforme est un principe fondamental de l'astronomie. Or, les observations contredisent l'uniformité des mouvements célestes. Pour concilier ce principe avec la réalité, Copernic, qui a rejeté l'équant de Ptolémée, est obligé d'ajouter à son système une multitude de petits épicycles et d'excentriques dont l'effet est de moduler la vitesse de chaque planète sur son parcours. Au nom du principe antique de l'uniformité des mouvements circulaires, Copernic a donc rendu son système tout aussi complexe que celui de Ptolémée. Cependant, de nombreux commentateurs de l'œuvre du chanoine-astronome maintiennent que celui-ci a introduit une simplification, car les épicycles de Copernic, beaucoup plus petits que les cercles déférents, ne sont là que pour corriger les petites variations de vitesse et de position des planètes (qui se déplacent en réalité à vitesse variable sur des orbites elliptiques) par rapport à une trajectoire circulaire uniforme, et ne sont pas nécessaires, en première approche, pour décrire les irrégularités apparentes les plus importantes de leurs trajectoires (rétrogradations). Au contraire, les épicycles de Ptolémée, de tailles beaucoup plus importantes (et comparables à celles des déférents), sont indispensables pour expliquer ces irrégularités et ne peuvent donc être omis, même en première approximation.

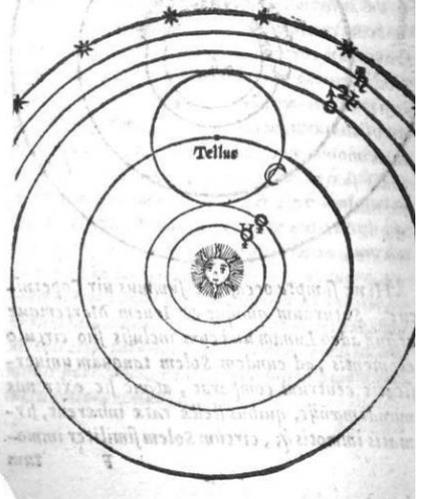
Systema maximarum mundi partium, quibus totam rerum vniuersitatem connexam esse tradiderunt communiter authores.



Systema maximarum vniuersitatis partium ex sententia Martiani Capellæ.



Systema vniuersitatis de sententia summi viri Nicolai Copernici Torinensis.



Représentation par Valentin Naboth, en 1576, du modèle géocentrique classique (à gauche), du modèle géo-héliocentrique transmis par Martianus Capella (au centre) et du modèle héliocentrique de Copernic

B) Tycho Brahe (1546-1601)

C'est un astronome danois, issu d'une grande famille associée de longue date aux affaires du royaume. Il sera élevé par son oncle maternel. Tycho Brahe marque une rupture dans l'histoire de l'astronomie, et plus généralement dans l'histoire des sciences. À une époque où prévaut encore le respect de la tradition et des anciens, il donne la priorité à l'observation, avec le souci constant de valider ses hypothèses au regard de celles-ci. Il prend grand soin de la fabrication et de la mise au point de ses instruments qui lui permettent de recueillir un nombre considérable de données. Bien qu'effectuées à l'œil nu, ces mesures sont, à leur meilleur, au moins 10 fois plus précises que celles de ses prédécesseurs en Europe. Ainsi, ses observations de la supernova de 1572, le conduisent à remettre en cause l'immutabilité du monde supra-lunaire énoncée par Aristote, remise en cause confirmée par ses observations de la grande comète de 1577, dont il met en évidence qu'elle ne peut être un phénomène atmosphérique (sub-lunaire). Ses observations très précises des positions de la planète Mars jouent un rôle décisif dans la découverte par Johannes Kepler de la trajectoire des planètes et plus généralement des trois lois qui régissent le mouvement de celles-ci. Bien que grand admirateur de Nicolas Copernic, il ne se résout pas à abandonner le géocentrisme (peur de l'Eglise ?), et préfère mettre au point un système mixte, dit géo-héliocentrique : la Terre reste immobile au centre de l'univers, les autres planètes tournent autour du soleil, entraînées également par le mouvement de celui-ci autour de la Terre. Bien que ruiné conceptuellement par les découvertes de Kepler puis de Newton, le système sera soutenu tout au long du XVII^e siècle par les jésuites, qui y verront la seule façon de sauver l'immobilité de la Terre, conforme à la lettre des Écritures. Il sera définitivement éliminé par la découverte de l'aberration de la lumière qui met en évidence expérimentalement le mouvement annuel terrestre.

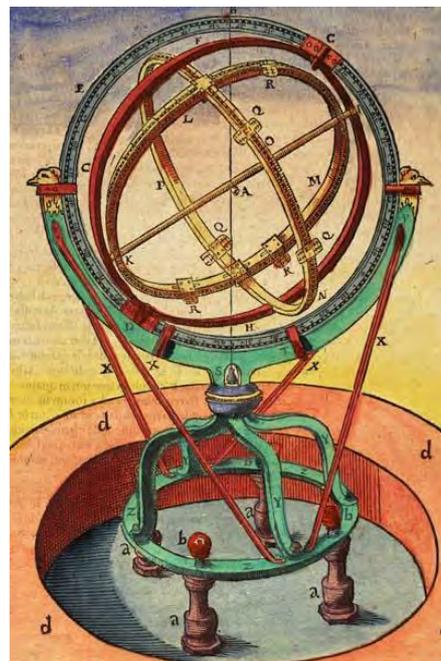
Jeune homme, Tycho bénéficie d'une éducation ouverte aux sciences dans un système universitaire protestant. Il étudie d'abord à Copenhague, où il découvre en particulier l'astronomie, puis fréquente de longues années les universités protestantes allemandes. Grâce au soutien du roi Frédéric II de Danemark, Tycho Brahe bénéficie pendant une vingtaine d'années de l'usage de l'île de Ven et de confortables revenus pour mener à bien ses travaux. Il y fait construire le palais d'Uraniborg, qui est sa demeure, mais surtout un lieu d'études et un véritable centre de recherche avant l'heure, muni d'un observatoire, mais aussi d'un centre artisanal pour la confection des instruments, et d'une imprimerie pour diffuser ses travaux. Il y forme de nombreux étudiants et reçoit des visiteurs, en particulier scientifiques, de l'Europe entière. Après la mort de son protecteur et l'interrègne qui suit, Tycho finit par perdre le soutien du successeur de celui-ci, Christian IV, et choisit d'émigrer. Accueilli par l'empereur Rodolphe II, qui en fait son mathématicien impérial, il s'installe près de Prague. C'est là que Kepler le rejoint pour devenir près d'une année son assistant, et hériter, à la mort de l'astronome danois en 1601, des exceptionnelles observations de celui-ci.

Tycho Brahe se consacre à la construction de nombreux instruments astronomiques de mesures visuelles.

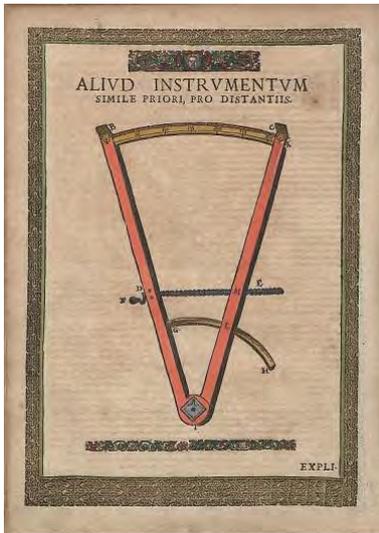
- 1) Il acquiert en 1564 un « bâton de Jacob ». Le bâton de Jacob est adapté pour leur usage par les navigateurs hauturiers, d'abord espagnols et portugais, au tout début du XVI^e siècle : la première description connue se trouve dans un livre de navigation datant d'un peu avant 1520. Dans ce domaine il est aussi appelé arbalestrille, arbalète, ou encore balestille. L'adaptation à la navigation du bâton de Jacob est aussi inspirée du kamal, un instrument utilisé par les navigateurs arabes de l'Océan Indien, et observé par Vasco de Gama en 1498. Il est constitué d'une planchette de bois avec une ficelle passant par le milieu de celle-ci. La ficelle tendue et la planchette joue pour la visée un rôle analogue à la flèche et au marteau du bâton de Jacob, la mesure étant donnée par la longueur de la partie de la ficelle qui est tendue. Plusieurs tailles de planchettes sont disponibles (de même que le navigateur disposera de plusieurs tailles de marteaux pour son bâton de Jacob). Les navigateurs chinois ont utilisé un instrument analogue au kamal au XV^e siècle. L'instrument est d'abord utilisé pour mesurer la hauteur de l'étoile polaire, avec une graduation de 0 à 90° sur sa flèche, puis pour la hauteur du soleil à son zenith, ce qui permet dans les deux cas de déterminer la latitude.
- 2) À Augsbourg en 1569 Tycho conçoit et fait fabriquer pour la première fois un instrument astronomique, un grand compas, ou demi-sextant (ouverture de 30 degrés), dont les branches mesurent 1,5 mètre de long, et qui est reproduit vingt-cinq ans plus tard dans l'*Astronomiae Instauratae Mechanica*. L'instrument de bois et cuivre (pour l'arc) est relativement léger. Il en fera cadeau à Paul Hainzel à son départ d'Augsbourg, mais fera construire un instrument similaire deux ans plus tard à Herrevad, avec cette fois deux arcs de cuivre interchangeables de 30 et 60 degrés, soit à la fois demi-sextant et sextant, qu'il adaptera pour observer la « nouvelle étoile » (supernova de 1572).
- 3) Le grand quadrant, d'un rayon de 5,5 mètres, construit chez Paul Hainzel sur les plans de Tycho à Augsbourg en 1570 (reproduit dans l'*Astronomiae Instauratae Mechanica*).
- 4) Le sextant avec lequel Tycho Brahe en 1572 observe la « nouvelle étoile », dans la constellation de Cassiopée. Tycho l'a fait construire à Herrevad sur le modèle de son demi-sextant d'Augsbourg. Il décrit dans cette gravure de l'*Astronomiae Instauratae Mechanica* la façon dont il l'a adapté et monté horizontalement, se servant d'une fenêtre orientée au nord.



1



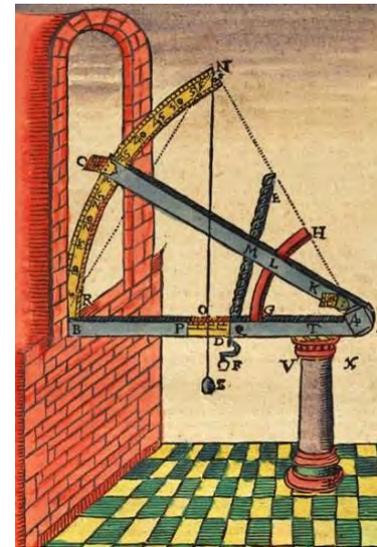
L'une des sphères armillaires de Tycho Brahe (*Astronomiae instauratae mechanica*)



2



3



4

Dès les années 1570, Tycho Brahe exécuta les premiers tracés des trajectoires des comètes et en déduisit leur distance à la Terre (1577) : par là, les grandes distances caractéristiques de l'astronomie devenaient calculables. Cinq années auparavant, Tycho avait tenté d'estimer la distance de la Supernova 1572 par un calcul de parallaxe, et notait méticuleusement les positions successives de Mars. Ce travail d'observation, effectué par Tycho Brahe à l'aide du quadrant mural (voir Iconographie) qu'il avait fait construire dans son château d'Uraniborg, est une condition essentielle des découvertes ultérieures de son assistant, Johannes Kepler. Ce quadrant faisait de l'antique sphère armillaire un instrument de mesure universel.

Ses principaux travaux :

Supernova

SN 1572 (ou *Nova de Tycho*) est une supernova survenue dans la constellation de Cassiopée, et l'une des rares à avoir été visible à l'œil nu. Elle fut observée le 11 novembre 1572 par Tycho Brahe, depuis l'Abbaye de Herrevad, alors qu'elle était plus brillante que Vénus, avec une magnitude apparente de -4. Elle cessa d'être visible à partir de mars 1574. En fait, il semble que Brahe ne soit pas réellement le premier à l'avoir observée, elle aurait été vue par Wolfgang Schuler dès le 6 novembre 1572, par John Dee et son disciple Thomas Digges, puis par l'astronome italien Francesco Maurolico. Mais Brahe est le premier à l'avoir décrite et étudiée en détail. Dans un premier temps, Tycho Brahe a fait remarquer que l'objet n'a pas de parallaxe diurne dans le contexte des étoiles fixes d'arrière-plan. Ce qui implique qu'il se trouvait forcément plus loin que la Lune et les planètes, qui elles, affichent de telles parallaxes. Ensuite, il constate que, pendant plusieurs mois, l'objet n'a pas modifié sa position par rapport aux étoiles fixes, comme le font les planètes.

Cela lui inspire la conclusion que le nouvel objet céleste n'était pas une planète, mais une étoile fixe dans le domaine stellaire, au-delà de toutes les planètes. Il publia à ce sujet un petit livre appelé *De Stella Nova, De la nouvelle étoile* (1573). Nous savons aujourd'hui que cette supernova se trouve à 7 500 années-lumière de la Terre.

L'apparition de la supernova de 1572 est l'un des deux ou trois événements les plus importants de l'histoire de l'astronomie. La « nouvelle étoile » a contribué à briser les anciennes représentations du ciel, et à déclencher une révolution en astronomie. Cette découverte a permis de réaliser de meilleures classifications astrométriques cataloguées, et a rendu nécessaire l'utilisation d'instruments d'observation astronomique plus précis. La Supernova de 1572 est souvent appelée « la supernova Tycho », en raison du vaste travail que Tycho Brahe avait accompli à son sujet.

La grande comète de 1577



Illustration de la Grande comète de 1577 vue de Prague

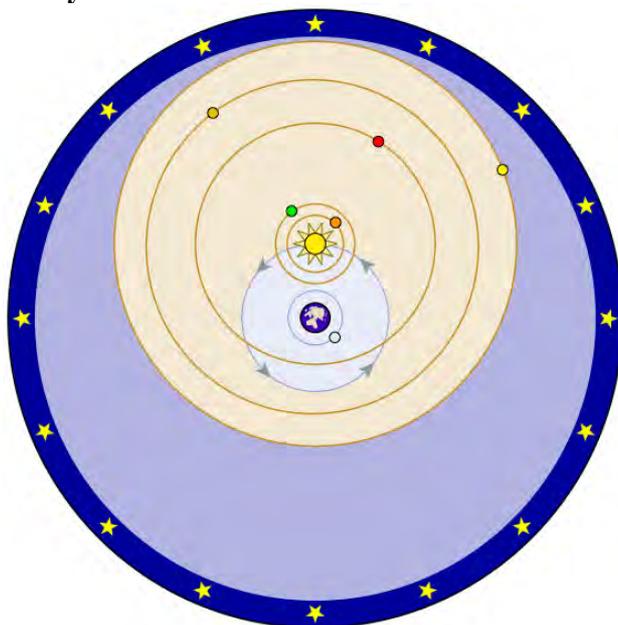
En 1577, Tycho ne dispose pas encore de ses meilleurs instruments, mais il acquiert en début d'année sa première horloge qui donne l'heure à la seconde, et, après un essai infructueux, fait construire un quadrant astronomique qui lui donne satisfaction.

Un soir de novembre, il remarque pour la première fois une nouvelle étoile qui se révèle être la comète qu'il attendait de pouvoir observer depuis longtemps. La grande comète de 1577 (C/1577 V1) passe près de la Terre cette année-là, et elle est remarquée dans l'Europe entière. L'observation de celle-ci n'est pas simple. Elle est proche du Soleil et, à son apparition, n'est visible qu'une heure après le coucher de celui-ci. Tycho va pouvoir l'observer jusqu'en janvier de l'année suivante. Il cherche à calculer sa parallaxe diurne, en reconstituant le mouvement apparent de la comète, et en le comparant avec celui de la Lune. Il finit par démontrer que la parallaxe diurne est insignifiante, et en donne une majoration qui la relègue forcément au-delà de la Lune, au moins quatre fois plus loin. C'est un résultat essentiel : il fait de la comète un corps céleste contrairement à ce qu'Aristote avait théorisé dans *Les Météorologiques*. Pour celui-ci les comètes sont des phénomènes atmosphériques qui se forment en dessous de la Lune. En observateur neutre, Tycho examina toutes les données recueillies ainsi que les siennes propres. Pour lui, le résultat était clair : la comète devait décrire une orbite autour du Soleil « bien au-delà de la Lune », recoupant celles des planètes. Il en tira la conséquence que les planètes ne reposaient pas sur des sphères solides transparentes (les fameuses « sphères de cristal » d'Aristote) que Georg von Purbach avait rétablies dans sa représentation de la sphère céleste. Bien qu'il eût conservé le géocentrisme, il remit en question deux points importants de modèles antiques auxquels certains de ses contemporains étaient encore attachés : la « solidité » des sphères et l'immuabilité de l'espace supra-lunaire.

En se basant sur les croquis trouvés sur des brouillons de Brahe, il est possible que la comète soit passée près de la planète Vénus. Ces croquis présentent la Terre au centre, avec le Soleil tournant autour d'elle, et

les autres planètes connues tournant autour du Soleil. C'était l'hypothèse personnelle de Brahe, basée sur l'agencement du système solaire, qui aujourd'hui a changé suivant la théorie de l'héliocentrisme. Malgré cette mauvaise vision du système solaire, les milliers de mesures très précises prises par Brahe ont permis à Johannes Kepler de théoriser les lois des mouvements des planètes connues sous le nom de Lois de Kepler. Malgré toutes les mesures que Brahe avait prises, il ne put calculer exactement la distance entre la comète et l'atmosphère de la Terre. La découverte de Brahe que les comètes étaient des objets extra-terrestres même si elle fut communément admise posa quelques questionnements : quelle est la nature de ces objets, d'où viennent-ils, avaient-ils un chemin qu'ils suivaient ? Ces questions, parmi tant d'autres, furent fortement débattues pendant le XVII^e siècle, et beaucoup de théories circulèrent parmi la communauté des astronomes. Galilée affirma que les comètes étaient des phénomènes optiques, ce faisant, leurs parallaxes étaient impossible à mesurer. Cette hypothèse n'était pas largement acceptée. Le passage de la comète en 1577 permit aux théories sur les comètes, leur nature et place dans le ciel d'être drastiquement réévaluées et de mettre en place les bases de l'observation spatiale des comètes. Parmi les découvertes que Brahe fit, il remarqua que les queues des comètes étaient dirigées à l'opposé du Soleil.

Modèle géo-héliocentrique de Tycho Brahe



Dans ce modèle géo-héliocentrique de Tycho Brahe, les objets célestes sur les orbites en bleu (Lune et Soleil) tournent autour de la Terre. Les objets sur les orbites en orange (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne) tournent autour du Soleil. À la périphérie se trouvent les étoiles fixes.

Tycho se donnait une discipline d'observation quotidienne; il a formé toute une génération d'astronomes, leur inculquant l'art de l'observation et a déduit de celles qu'il effectua un système, dit « de Tycho Brahe », élaboré à partir de la théorie géocentrique de Ptolémée, de la théorie mixte d'Héraclide du Pont (IV^e siècle av. J.-C.), pour qui le Soleil orbite autour de la Terre, tandis que les cinq planètes tournent autour du Soleil, et de la théorie héliocentrique de Copernic. Dans la théorie de Tycho Brahe, le Soleil et la Lune tournent autour de la Terre immobile, tandis que Mars, Mercure, Vénus, Jupiter et Saturne tournent autour du Soleil. Le système de Copernic (1473 - 1543) est déclaré contraire à la Bible par l'Église en 1616. Le système de Tycho Brahe fut adopté par les jésuites.

Kepler ne parvint pas à convaincre Tycho d'adopter le modèle héliocentrique du système solaire. Brahe semble ne pas avoir eu d'objection de principe, mais s'y être opposé pour des raisons relatives aux observations. En effet, il considérait que si la Terre orbitait annuellement autour du Soleil, il devrait y avoir une parallaxe stellaire observable sur une période de six mois, au cours de laquelle l'angle d'orientation d'une étoile changerait, ce qui n'était pas perceptible. Reprenant les thèses de Brahe lors du procès de Galilée, l'inquisiteur saint Robert Bellarmín objecta que, si la Terre se mouvait, on devait observer une parallaxe. Mais aucune parallaxe n'ayant été mesurée, ce fait devenait un argument contre l'héliocentrisme.

Galilée répondit que les étoiles étaient trop lointaines pour que la parallaxe puisse être vue et mesurée avec les instruments d'alors. Dans les années qui ont suivi, Galilée, par son observation sur les phases de Vénus en 1610, invalida le système ptoléméen. Le système de Brahe devint alors le principal concurrent de celui de Copernic. L'Église catholique finit par abandonner le système géocentrique de Ptolémée, au profit de celui de Tycho Brahe, plus conforme aux observations. C'est au cours de l'année 1729 que James Bradley réussit à prouver l'automouvement de la Terre par rapport aux étoiles fixes, selon sa démonstration expérimentale de l'aberration stellaire. Bradley obtint un déplacement maximal de l'aberration de l'ordre de vingt secondes d'arc, une valeur très petite qui ne pouvait être constatée par des instruments conçus avant le début du XVII^e siècle. Ces nouvelles observations conduisirent à l'élimination du système de Tycho Brahe. Quant aux parallaxes, elles ne furent observées qu'un siècle plus tard par Friedrich Wilhelm Bessel en 1828. Malgré son erreur, Tycho se classe dans un mode de pensée basé sur l'observation et l'expérimentation du monde, comme ce sera le cas aussi pour Kepler ou Galilée. Il s'oppose de ce fait à un mode de pensée fondé sur le choix de systèmes seulement théoriques, comme celui d'Aristote, qui influença pourtant la recherche astronomique pendant des siècles ou comme celui de Copernic, qui, à plusieurs égards, resta fermement ancré dans la tradition des Anciens.

L'apport de Tycho Brahe à l'astronomie :

Tycho a été le dernier des astronomes de l'ère précédant l'invention de la lunette astronomique et du télescope. Alors qu'il avait dix-sept ans, lors d'une conjonction de Jupiter avec Saturne, Tycho se rendit compte que toutes les tables astronomiques ne concordaient pas et qu'il était quasiment impossible de faire une quelconque prévision. Ce fait eut une très grande influence sur le projet de sa vie. Il s'attacha sa vie durant à y remédier. Par ses observations, il recueillit une montagne de données qui le conduisirent à cartographier le ciel et produire des données fiables qui permirent à Kepler d'établir et de publier en 1627 les tables rudolphines. Il forma dans son école à Uraniborg toute une génération d'astronomes dont Johannes Kepler, par ses méthodes d'observation et à l'aide de ses instruments pour l'aider à réaliser ce projet colossal.

Durant sa carrière, il affina sans cesse ses instruments d'observation. Il publia en mai 1598 le catalogue stellaire avec les positions de 1 004 étoiles. Pour l'époque, c'est la meilleure référence mondiale de précision astrale. C'est grâce à ce projet que, quelques années plus tard, toutes ces observations des trajectoires des planètes permirent à Johannes Kepler, son assistant, d'analyser le chemin des astres et d'en ressortir trois joyaux : les lois universelles de Kepler. Plus tard Isaac Newton en fit une démonstration mathématique et en déduisit la loi universelle de la gravitation. Il fut le premier astronome à percevoir la réfraction de la lumière et à établir une table complète pour corriger les mesures astronomiques dues à cet effet.

Il déduisit de ses observations un système planétaire, dit « système de Tycho Brahe ». Il s'agit d'un système hybride entre la théorie géocentrique et la théorie héliocentrique. Le système Tycho devint alors le principal concurrent du système de Copernic. À propos de la paternité de son système, un conflit a surgi avec l'astronome Ursus, qui avait visité Uraniborg avec Heinrich Rantzau ami de Tycho Brahe. En définitive, il en ressort que ce dernier se serait inspiré du modèle de Paul Wittich (1546-1586). Tycho améliora ou inventa une douzaine d'instruments différents dont certains, avant leur perfectionnement et leur usage en astronomie, furent d'abord utilisés dans la navigation maritime.

Par ses observations de la Grande comète de 1577, Tycho démontra qu'elle n'avait pas de parallaxe diurne mesurable, et que cet objet devait se situer bien au-delà de l'influence terrestre. Il montra ainsi que les comètes ne sont pas des phénomènes de l'atmosphère terrestre. Tycho était un organisateur, il savait utiliser tout ce que la science astronomique de l'époque possédait. Il se procura notamment les livres de Paul Wittich. Sa bibliothèque s'enrichit par des échanges de livres et des achats. Tycho envoya ses publications aux princes et aux écoles à travers le continent et reçut beaucoup de livres en cadeau. Pour constituer son importante bibliothèque il n'hésitait pas à racheter des bibliothèques complètes. C'est aussi par ses contacts et ses voyages qu'il recueillit une multitude d'informations liées à son projet. Pour traiter cette masse de données, Paul Wittich enseigna à Tycho sa nouvelle méthode *Algoritmo di prostaferesi*, un algorithme précurseur des logarithmes, accélérant ainsi la production des calculs de son équipe.

Tycho Brahe demanda à Johannes Kepler de calculer l'orbite précise de Mars, pour laquelle il avait remarqué une excentricité de la trajectoire, considérée comme une anomalie à une époque où, sous l'influence d'Aristote, on pensait encore parfois que les mouvements des planètes décrivaient des cercles, figures parfaites. Tycho pensa donc à construire des excentriques pour les orbites planétaires. De tels cercles excentriques étaient admis depuis l'antiquité, par le biais des épicycles, pour la Lune et le Soleil. C'est grâce aux observations méticuleuses de Tycho Brahe que Johannes Kepler put élaborer les bases scientifiques de la mécanique céleste reposant sur le système héliocentrique qu'Isaac Newton porta à son aboutissement. Déjà avec Tycho Brahe, les modèles antiques n'étaient plus adaptés et une refonte totale de la géométrie des orbites et des tables s'imposait. Cependant celui-ci, imprégné de scrupules religieux et refusant le système théorique de Copernic, chercha à créer un modèle de représentation du monde qui était un compromis entre ce dernier et celui de Ptolémée. Son système qui s'avérait compliqué ne fut pas suivi par ses pairs. Toutefois, à l'époque même où Galilée sera contraint d'abjurer, Gassendi acceptera son système, quoique sans grande conviction, et le jésuite Riccioli en proposera une variante. Il convient donc de remarquer qu'à partir du modèle de Brahe, il devient possible d'envisager l'héliocentrisme des planètes (à l'exclusion de la Terre) sans susciter de condamnation par l'Église. La foi ecclésiastique dans le modèle antique est ébranlée, prélude à son abandon de fait par le pape Benoît XIV vers 1750.

C) Giordano Bruno (1548-1600)

Giordano Bruno, né en janvier 1548 à Nola en Italie et mort le 17 février 1600 à Rome, est un ancien frère dominicain et philosophe. Sur la base des travaux de Nicolas Copernic et Nicolas de Cues, il développe la théorie de l'héliocentrisme et montre, de manière philosophique, la pertinence d'un univers infini, qui n'a pas de centre, peuplé d'une quantité innombrable d'astres et de mondes identiques au nôtre. Accusé formellement d'athéisme (confondu avec son panthéisme) et d'hérésie (particulièrement par sa théorie de la réincarnation des âmes) par l'Inquisition, d'après ses écrits jugés blasphématoires (où il proclame en outre que Jésus-Christ n'est pas Dieu mais un simple « mage habile »), que le Saint-Esprit est l'âme de ce monde, que Satan sera finalement sauvé, et poursuivi pour son intérêt pour la magie, il est condamné à être brûlé vif au terme de huit années de procès ponctuées de nombreuses propositions de rétractation qu'il paraissait d'abord accepter puis qu'il rejetait. Une statue de bronze à son effigie trône depuis le XIX^e siècle sur les lieux de son supplice, au Campo de' Fiori à Rome. **Ce fut un esprit original, visionnaire et novateur en bien des domaines, mais également un grand et audacieux provocateur.**



Portrait de Giordano Bruno (XIX^e siècle, d'après une gravure publiée dans le Livre du recteur, 1578)

Trajectoire dominicaine (1548 - 1575)

Bruno naît en janvier 1548 à Nola, bourgade proche de Naples, qui relève de la souveraineté espagnole. Son nom de baptême est Filippo. Sa famille dispose de revenus modestes (son père est « homme d'armes »). L'école la plus proche lui donne une instruction. Imprégné d'humanisme, d'auteurs classiques, d'étude de la langue et de la grammaire latine, il restera toutefois marqué par le pédantisme accompagnant l'enseignement, qui le rebute. Il rejoint l'université de Naples, où il découvre la mnémotechnique, art de la mémoire, qui constituera rapidement une de ses disciplines d'excellence. Il prend aussi des cours particuliers, qui le mettent au cœur des débats philosophiques entre platoniciens et aristotéliens. Sa culture, alors essentiellement humaniste, s'enrichit d'un apport théologique déterminant. Le 15 juin 1565, il entre chez les Frères Prêcheurs de San Domenico Maggiore, d'une part, prestigieux couvent dominicain pour la qualité des titres qu'il attribue, réputés dans toute l'Italie, d'autre part précieux refuge en ces temps de disette et d'épidémie. Il y rencontre Giordano Crispo, maître en métaphysique, dont il adopte le prénom en guise d'hommage. Il est alors un dominicain modèle, vivant selon la devise « *verba et exempla* » (« par le verbe et par l'exemple ») et ordonné prêtre en 1573.

La rupture

Il devient lecteur en théologie en juillet 1575. S'il semble poursuivre sa carrière de dominicain modèle (il soutient une thèse sur la pensée de Thomas d'Aquin et de Pierre Lombard), Bruno dissimule en fait une rébellion contre le carcan théologique. Au fil des années, il a su se forger une culture éclectique et peu orthodoxe, sans cesse alimentée par un appétit de lecture et des capacités exceptionnelles de mémorisation. Il est particulièrement adepte des œuvres d'Érasme, humaniste qui affirme sa liberté de pensée par rapport aux autorités ecclésiastiques. Il a le goût de l'hermétisme et de la magie. Enfin, grandit en lui une passion pour la cosmologie, détachée de l'approche théologique. La rupture qui couvait finit par être consommée. Dès sa première année de noviciat, il avait ôté des images saintes de sa chambre, notamment celles représentant Marie, s'attirant l'accusation de profanation du culte de Marie. Au fil des années, les heurts deviennent plus durs, tout particulièrement au sujet de la Trinité, dogme qu'il repousse. On l'accuse d'avoir lu et étudié des livres interdits. En février 1576, il doit abandonner le froc dominicain et fuir, une instruction ayant été ouverte à son encontre afin de le déclarer hérétique.

L'errance (1576 - 1592)

Dans un premier temps, Bruno espère rester en Italie. Il survit, de 1576 à 1578, par des leçons de grammaire ou d'astronomie, mais sa condition d'apostat l'amène à changer fréquemment de ville ou de région : Gênes, Noli, Savone, Turin, Venise, Padoue, Brescia, Naples abritent successivement ses doutes et ses recherches. Durant ces deux années, il ne pourra publier qu'un seul ouvrage, dont on ne connaît que le titre : *De' segni de tempi* (*Des Signes du temps*). Épuisé par sa condition, il finit par s'exiler dans le comté de Savoie, à Chambéry tout d'abord, puis il va dans la Genève calviniste. Mais son intégration dans la communauté évangélique ne durera qu'un temps : une dispute avec la hiérarchie (il conteste la compétence d'un de ses membres, le professeur de philosophie Antoine de La Faye) lui vaut arrestation et excommunication, le 6 août 1578. Il repart et rejoint Lyon, puis Toulouse, alors sujette au dogmatisme catholique le plus intègre. Toutefois, il parvient à enseigner deux ans durant, et à obtenir le titre de *magister artium* (maître ès-arts) ainsi que la fonction de « professeur ordinaire » (contractuel). Il alterne la physique et les mathématiques, et publie un ouvrage sur la mnémotechnique : *Clavis Magna*. Intéressé par l'ouvrage et impressionné par la mémoire colossale de Bruno, le roi de France Henri III le fait venir à la cour et devient son protecteur, lui offrant, jusqu'en 1583, cinq années de paix et de sécurité. Il figure parmi les philosophes attirés de la cour. Henri III lui octroie une chaire de « lecteur extraordinaire et provisionné » au Collège des lecteurs royaux, préfiguration du Collège de France. Son discours s'arrondit et, face aux tensions religieuses, il adopte une position tolérante. En 1582, son talent d'écrivain, ironique et lyrique, vivant, imagé, se confirme dans *Candelaio* (*Le Chandelier*), comédie satirique sur son temps. En avril 1583, Bruno se rend en Angleterre, à Londres puis à Oxford, où il reçoit un accueil hostile. Précédées par une réputation brillante mais sulfureuse, ses idées malmènent l'Église anglicane; il essuie de nombreuses critiques. Sûr de lui et de ses idées et plein de mépris pour celles de ses contradicteurs, Bruno consacre deux années à répliquer; il apparaît alors comme un philosophe, théologien et scientifique novateur, mais impertinent.

En 1584 paraissent :

- *La Cena de le Ceneri (Le Banquet des cendres)*;
- *De la causa, principio, e Uno (La Cause, le principe et l'un)*;
- *De l'infinito, universo e Mondi (De l'Infini, de l'univers et des mondes)*.

Dans ces ouvrages il expose sa vision cosmographique audacieuse et révolutionnaire. Il y soutient les thèses coperniciennes du monde, et va au-delà encore en imaginant un univers peuplé d'une infinité de mondes :

« Nous affirmons qu'il existe une infinité de terres, une infinité de soleils et un éther infini ».

En 1585, trois nouveaux ouvrages approfondissent et poursuivent ses audaces :

- *Spaccio de la Bestia Trionfante (L'Expulsion de la bête triomphante)* s'attaque aux attitudes calvinistes et catholiques;
- *Cabala del cavallo Pegaseo (La Cabale du cheval Pégase)*, opusculé satirique, démolit systématiquement la vénérable référence aristotélicienne;
- *De gl'heroici furori (Les Fureurs héroïques)* élimine l'idée d'un monde centré et présente un univers où Dieu n'a plus de lieu.

En octobre 1585, il retourne à Paris, où il entreprend une critique serrée d'Aristote, avec *Figuratio Aristotelici Physici auditus (Esquisse de la physique aristotélicienne)* et *Centum et viginti articuli de natura et mundo (120 articles sur la nature et le monde)*. Mais les positions religieuses se durcissent : Henri III ne peut plus se permettre de défendre un révolutionnaire du savoir. De plus, Mordente, géomètre associé aux ligueurs, l'accuse de plagiat en s'attribuant la paternité du compas de proportion. Il s'exile en Allemagne en juin 1586; l'université de Marbourg puis celle de Wittenberg l'accueillent. Le voilà dans la communauté luthérienne. Mais, à l'automne 1588, après des heurts avec sa nouvelle hiérarchie, Giordano Bruno apprend son excommunication de l'Église luthérienne.

Il reprend la route, toujours en Allemagne; ses ouvrages témoignent alors de sa volonté d'organiser sa pensée :

- *De innumerabilibus, immenso, et infigurabili*, réexamine sa cosmographie;
- Dans *De monade numero et figura*, Bruno mène une réflexion sur le rapport entre nombres et les figures géométriques;
- *De triplici minimo et mensura*, réflexions sur l'infiniment petit (précurseur des études sur l'atome);
- *De imaginum, signorum et idearum compositione (De la composition des images, des signes et des idées)*, introduit un prodigieux système mnémotechnique.

Le procès et l'exécution (1592 - 1600)

Les circonstances du procès sont relatées dans des documents établis à Venise, et par son résumé, retrouvé en 1940 dans les archives personnelles du pape Pie IX par le cardinal Angelo Mercati et publié en 1942. Les documents originaux du procès ont été définitivement perdus après leur transport à Paris - avec d'autres archives de l'inquisition - sur ordre de Napoléon. Les circonstances de la mort de Giordano Bruno sont relatées dans la copie d'une lettre de Gaspard Schopp, dit Scioppius, au jurisconsulte allemand Rittershausen située en annexe du livre *Machiavellizatio*, d'auteur inconnu, publié à Saragosse en 1621, lettre citée ensuite pour la première fois dans la préface de "Commentaires sur Zoroastre", un ouvrage du pasteur Jean-Henri Ursin, publié en 1661. Le faible nombre de documents concernant cette exécution a conduit certains à douter de sa réalité. C'est le cas, par exemple, de Théophile Desdouts, journaliste et professeur de philosophie du XIX^e siècle. Dans son article *La légende tragique de Giordano Bruno*, il remet en cause l'authenticité de la lettre de Gaspard Schopp. Faisant en outre remarquer qu'une telle exécution à l'aube du XVII^e siècle aurait dû laisser plus d'un témoignage écrit, il émet l'hypothèse que Giordano Bruno aurait pu n'être exécuté qu'en effigie. Cependant l'historien des sciences Arkan Simaan met à bas l'hypothèse de Théophile Desdouts, précisant que l'on connaît maintenant des documents officiels datant de février 1600 et relatant cette exécution. À l'issue d'une dernière expulsion à Francfort, un séjour à Zurich, puis un retour à Francfort, Bruno accepte en août 1591 l'invitation à Venise d'un jeune patricien, Giovanni Mocenigo. Les deux hommes ne s'entendent pas : Bruno revient probablement motivé par l'envie d'être nommé à la chaire de mathématiques de l'université de Padoue, mais Mocenigo attend de Bruno qu'il lui enseigne la mnémotechnique et l'art d'inventer. Le patricien considère vite qu'il n'en a pas pour son argent,

alors que Bruno considère que sa présence est déjà un honneur pour son hôte. Déçu, Bruno veut repartir et froisse Mocenigo, qui commence par le retenir prisonnier puis, ne parvenant pas à le soumettre, finit par le dénoncer à l'inquisition vénitienne, le 23 mai 1592. Bruno est arrêté, jeté à la prison de San Domenico di Castello. Au cours du procès, qui durera huit années, l'acte d'accusation va évoluer. Le premier acte d'accusation se concentre sur ses positions théologiques hérétiques : sa pensée antidogmatique, le rejet de la transsubstantiation, que le concile de Trente vient de confirmer, et de la Trinité, son blasphème contre le Christ, sa négation de la virginité de Marie. Mais ses activités sont déjà relevées : sa pratique de l'art divinatoire, sa croyance en la métempsycose, sa vision cosmologique. Au long du procès, l'acte d'accusation ne cessera de s'aggraver.

Blanchi par les tribunaux vénitiens, Bruno est presque libéré. Mais la Curie romaine semble vouloir lui faire payer son apostasie. Sur intervention personnelle du pape auprès du doge, une procédure tout à fait exceptionnelle, Rome obtient l'extradition et Bruno se retrouve dans les geôles vaticanes du Saint-Office.

En 1593, dix nouveaux chefs d'accusation sont ajoutés. Bruno subit sept années de procès, ponctuées par une vingtaine d'interrogatoires menés par le cardinal Robert Bellarmine, qui fut également engagé dans l'instruction qui conduisit au procès du système de Copernic en 1616. Il lui arrive de concéder un geste de rétractation, mais se reprend toujours : « Je ne recule point devant le trépas et mon cœur ne se soumettra à nul mortel. » Le pape Clément VIII somme une dernière fois Bruno de se soumettre, mais Bruno répond : « Je ne crains rien et je ne rétracte rien, il n'y a rien à rétracter et je ne sais pas ce que j'aurais à rétracter. » Le 20 janvier 1600, Clément VIII ordonne au tribunal de l'Inquisition de prononcer son jugement qui le déclare hérétique et qui, « devant son extrême et résolue défense », le condamne à être remis au bras séculier pour être puni, selon la formule habituelle, « avec autant de clémence qu'il se pourrait et sans répandre de sang » (« *ut quam clementissime et citra sanguinis effusionem puniretur* »). À la lecture de sa condamnation au bûcher, Bruno commente : « Vous éprouvez sans doute plus de crainte à rendre cette sentence que moi à la recevoir. »



Statue de Giordano Bruno sur le lieu même de son exécution, Campo de' Fiori à Rome

Le 17 février 1600, il est mis nu, la langue entravée par un mors de bois l'empêchant de parler et de crier, sur le Campo de' Fiori et supplicié sur le bûcher devant la foule des pèlerins venus pour le Jubilé. Presque trois siècles plus tard, en 1889, une statue à son effigie, due au sculpteur Ettore Ferrari, est érigée sur le lieu de son supplice, au Campo de' Fiori, à deux pas du Palais de la Chancellerie qui abrite les services juridiques administratifs d'État de la Cité du Vatican. Il est représenté dans cette statue revêtu de l'habit de moine dominicain : pour l'Inquisition, en effet, afin que l'accusation soit valide, il était toujours un moine relaps et hérétique, alors qu'à ses propres yeux il avait cessé de l'être dès 1576 et qu'il avait rejeté ou interprété différemment la doctrine chrétienne après 1584, année où il publia en Angleterre *L'Expulsion de la bête triomphante* (*Spaccio de la bestia trionfante*), ouvrage proposant un programme de réformation morale, et une critique du luthéranisme et de divers aspects de la théologie chrétienne, qu'il dédicaça à Sir Philip Sidney, poète protestant. Chaque année, le 17 février, une foule de sympathisants se réunit devant la statue de Bruno pour commémorer sa mort sur le bûcher; ce rassemblement ne s'est interrompu que sous le régime fasciste, qui l'avait interdit.

Physique

Célèbre est la preuve donnée par Giordano Bruno sur la relativité du mouvement. Selon Aristote, la Terre est immobile; la preuve, c'est que, si l'on fait tomber du haut d'un arbre ou d'une tour une pierre, elle tombe verticalement; si la Terre tournait, elle se déplacerait pendant le temps de la chute, l'endroit où la pierre tomberait serait décalé dans le sens inverse du mouvement terrestre. Bruno démonte cette fausse preuve de la fixité de la Terre. Si on lâche une pierre du haut du mât d'un bateau en mouvement, elle tombera toujours au pied du mât, quel que soit le mouvement du bateau par rapport à la rive. Bateau, mât et pierre forment ensemble ce qu'on appellera plus tard un système mécanique. Il est impossible de déceler le mouvement d'un système mécanique par des expériences réalisées à bord de ce système lui-même. En montrant qu'on ne peut envisager le mouvement d'un corps dans l'absolu, mais seulement de manière relative, en relation avec un système de référence, Bruno ouvre la voie aux travaux de Galilée, et ce principe au fondement du référentiel inertiel, l'est encore pour la Théorie de la Relativité Restreinte.

« Toutes choses qui se trouvent sur la Terre se meuvent avec la Terre. La pierre jetée du haut du mât reviendra en bas, de quelque façon que le navire se meuve. » (*Le Banquet des cendres*).

Cosmologie

Dès 1584 (*Le Banquet des cendres*), Bruno adhère, contre la cosmologie d'Aristote, à la cosmologie de Copernic (1543), à l'héliocentrisme : double mouvement des planètes sur elles-mêmes et autour du Soleil, au centre. Mais Bruno va plus loin : il veut renoncer à l'idée de centre. « Il n'y a aucun astre au milieu de l'univers, parce que celui-ci s'étend également dans toutes ses directions. » Chaque étoile est un soleil semblable au nôtre, et autour de chacune d'elles tournent d'autres planètes, invisibles à nos yeux, mais qui existent. « Il est donc d'innombrables soleils et un nombre infini de terres tournant autour de ces soleils, à l'instar des sept « terres » [la Terre, la Lune, les cinq planètes alors connues : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne] que nous voyons tourner autour du Soleil qui nous est proche. » (Giordano Bruno, *L'Infini, l'Univers et les Mondes*, 1584).

Le monde est infini, sans clôture. Contre Copernic, Bruno « abolit » la sphère des étoiles fixes, puisque dans toutes les directions, à l'infini, le vide immense est parsemé d'étoiles. « *Intuition remarquable*, dit un commentateur. *Pour la première fois dans l'histoire de la pensée humaine, le ciel acquiert une profondeur*. Plus exactement, c'est la notion même de ciel qui s'évanouit, pour laisser place à celle d'espace homogène, c'est-à-dire identique à lui-même, dans toutes les directions ».

Bruno est le premier à postuler, contre la doctrine de l'Église de l'époque, la **pluralité de mondes habités** dans son ouvrage *De l'infinito universo et Mondi*. Il postule que les étoiles sont des soleils, plus petits car éloignés, et que ceux-ci peuvent abriter d'autres *créatures* à l'image de Dieu.

« Ainsi donc les autres mondes sont habités comme l'est le nôtre ? demande Burchio. Fracastorio, porte-parole de Bruno répond : « Sinon comme l'est le nôtre et sinon plus noblement. Du moins ces mondes n'en sont-ils pas moins habités ni moins nobles. Car il est impossible qu'un être rationnel suffisamment vigilant puisse imaginer que ces mondes innombrables, aussi magnifiques qu'est le nôtre ou encore plus magnifiques, soient dépourvus d'habitants semblables et même supérieurs. » (Giordano Bruno, *L'Infini, l'Univers et les Mondes*).

Contrairement à Copernic, il n'appuie pas ses dires sur des preuves mathématiques. « Concernant la mesure du mouvement [des corps célestes], la géométrie ment plutôt qu'elle ne mesure » (*De immenso*). Il se fie au jugement de l'intellect : « C'est à l'intellect qu'il appartient de juger et de rendre compte des choses que le temps et l'espace éloignent de nous. »

Philosophie

Giordano Bruno développe plusieurs idées qui feront fortune, bien qu'elles remontent à l'Antiquité : monade, infini. En 1591, à Francfort, Giordano Bruno a écrit en latin deux poèmes sur la monade : « Du triple minimum » (« *De triplici minimo* ») et « De la monade, du nombre et de la figure » (« *De monade, numero et figura* »). Il appelle minimum ou monade une entité indivisible qui constitue l'élément minimal des choses matérielles et spirituelles. La monade, qui correspond au point des mathématiques et à l'atome de la physique, est cet être primitif, impérissable, de nature aussi bien corporelle que spirituelle, qui engendre, par des rapports réciproques, la vie du monde. C'est une individualisation extrinsèque de la divinité; existence finie, elle est un aspect de l'essence infinie. Dieu, minimum et maximum, est la Monade suprême d'où s'échappent éternellement une infinité de monades inférieures. Giordano Bruno est le champion de l'idée d'infini.

Politique et religion

- C'est au XVIII^e siècle que Bruno est considéré comme un panthéiste et un libre penseur. On fait de lui un héritier du matérialisme antique et un précurseur de Spinoza.
- À l'inverse, il passe aux yeux de certains théologiens, ironie de l'histoire, pour un martyr de la réforme luthérienne.
- À la fin du XIX^e siècle, la réaction positiviste italienne contre l'Église et la monarchie l'identifie à un radical franc-maçon. L'Italie est alors en pleine réappropriation de ses symboles nationaux, qui permet de fonder la nation italienne une et indivisible autour du *Risorgimento*. En 1889, les laïcs italiens lui érigent d'ailleurs une statue, œuvre du sculpteur Ettore Ferrari, sur le Campo de' Fiori, à l'endroit même de son supplice.

Toutes ces interprétations empêchent aujourd'hui de bien cerner l'engagement originel de Bruno. Mais on peut toutefois remarquer que le point commun, immédiat, qui en ressort est bien son rejet de l'Église catholique. Celle-ci, en retour, n'a jamais ménagé sa mémoire :

- Le 24 mai 1889, au moment de l'inauguration de la statue que les libéraux ont voulu élever à Bruno dans Rome, le pape Léon XIII rendit publique la Déclaration *Amplissimum Collegium*, dans laquelle il proteste contre un projet "injuriant systématiquement la religion de Jésus-Christ, en décernant à un apostat du catholicisme les honneurs dus à la vertu, non sans une insolente ostentation".
- Un mois après, le 30 juin 1889, condamnant encore plus durement et plus solennellement le monument élevé dans Rome à G. Bruno, le pape Léon XIII fit publier cette fois l'encyclique *Quod Nuper*, adressée à tous les évêques d'Italie, qualifiant Bruno de "doublement apostat et hérétique convaincu", et le monument à "cet homme scélérat et perdu" comme "la principale - publique et permanente - d'une série d'injures et d'offenses gravissimes".
- En 1923, en 1930 et en 1931, coup sur coup, le pape Pie XI, béatifié, canonise et déclare Docteur de l'Église le cardinal Robert Bellarmine, qui avait été chargé, sur ordre de Clément VIII, d'instruire le procès de G. Bruno devant le tribunal de l'Inquisition romaine. Pie XI signifiait par là, accessoirement et indirectement, la permanence du jugement.
- Enfin, on prendra pour preuve de la constante condamnation de G. Bruno par l'Église l'avis définitif de la commission spéciale « pour l'étude de la controverse ptoléméo-copernicienne aux XVI^e et XVII^e siècles, dans laquelle s'insère le cas Galilée », commission instituée le 3 juillet 1981 par le pape Jean-Paul II. La Commission pontificale finit par revenir sur la condamnation de Galilée, mais elle réaffirme à nouveau la condamnation de l'Église contre Giordano Bruno : « La condamnation pour hérésie de Bruno, indépendamment du jugement qu'on veuille porter sur la peine capitale qui lui fut imposée, se présente comme pleinement motivée (pour des motifs théologiques), [car] le copernicisme de Bruno ne présente aucun intérêt au plan des raisons scientifiques ».

V L'âge de raison - la révolution scientifique (XVII^e siècle)

Les princes européens favorisaient l'astronomie dont ils faisaient un ornement de leur cour, donnant à la recherche une impulsion, autant financière qu'institutionnelle. Les souverains créèrent des observatoires royaux, tels l'Observatoire royal de Greenwich ou l'Observatoire de Paris. Par-delà la mission première assignée à ces institutions, à savoir calculer des tables de marine et s'attaquer au problème des longitudes, elles effectuaient de la recherche fondamentale. Là où les recherches des astronomes de cour se bornaient à combler les demandes du prince, ces observatoires royaux surent développer des traditions de recherche nationales, et devaient au début du XIX^e siècle tirer la recherche scientifique dans tous les domaines.

A) Johann Bayer (1572-1625)

C'était un magistrat allemand passionné d'astronomie. Ce n'était pas un astronome à proprement parler, mais son grand travail fut l'atlas astronomique *Uranometria*, édité à Augsbourg en 1603, et qui fut le premier atlas couvrant entièrement la sphère céleste. Il contenait 51 cartes sidérales : une pour chacune des 48 constellations de Ptolémée, une pour les cieux les plus au sud et qui n'étaient pas connus par Ptolémée, et deux planisphères. Il fut reproduit en 1627 sous le titre de *Coelum stellarum christianum*. Pour ses cartes des constellations, Bayer utilisa les observations les plus modernes de son époque, celles du grand astronome danois Tycho Brahe. Pour sa carte du ciel austral, il se référa aux relevés de deux navigateurs hollandais.

***Uranometria* introduisit les désignations de Bayer, qui sont encore employées aujourd'hui**, ainsi que certaines des constellations modernes. La nomenclature proposée par Bayer permit de simplifier grandement la classification des étoiles. Il imagina en effet de désigner les étoiles d'une même constellation en utilisant les lettres de l'alphabet grec : alpha (α) pour l'étoile la plus lumineuse, bêta (β) pour la deuxième plus brillante, et ainsi de suite [il y a quelques exceptions dans l'ordre décroissant des magnitudes apparentes de certaines étoiles]. Si une constellation comportait plus de 24 étoiles (le nombre des lettres de l'alphabet grec), il utilisait ensuite l'alphabet latin, puis des chiffres. La lettre grecque était suivie du nom latin (au génitif) de la constellation.

Exemples : Deneb, l'étoile la plus brillante de la constellation du Cygne (Cygnus en latin) s'appellera α Cygni, abréviation : α Cyg — Antarès, l'étoile la plus brillante de la constellation du Scorpion (Scorpio en latin) s'appellera α Scorpii, abréviation : α Sco

Cette nomenclature a été validée à l'échelle mondiale par l'Union astronomique internationale en 1930, d'après le travail d'E. Delporte. Dans les constellations où se situent de très nombreuses étoiles (nb > 24), on utilise une lettre ou un chiffre. Ex : 41 Cyg. On trouve aussi des étoiles doubles ou triples (qui ne sont pas visibles à l'œil nu). Par exemple Albiréo (β Cyg) est une double : Albiréo A et Albiréo B [en fait c'est même une triple, Albiréo A étant elle-même une double : Albiréo A1 et Albiréo A2]. Dans la nomenclature, ce seront β^1 et β^2 Cyg. Pour être complets, l'UAI en 1930 a également validé le nombre des constellations (88) et les limites des constellations en suivant un système de coordonnées équatoriales, divisant le ciel suivant des lignes d'ascension droite et de déclinaison. Mais, depuis ce choix, les limites des constellations ne sont plus parfaitement horizontales et verticales sur une carte du ciel moderne en raison de la précession des équinoxes. Le tracé est fait de manière à respecter les appartenances des différentes étoiles brillantes à leur constellation traditionnelle. Dans la mesure du possible, le rattachement d'étoiles ou d'objets célestes plus faibles, qui avaient été cités dans la littérature scientifique, est également respecté. De ce fait, ces limites sont parfois très tortueuses, poussées d'un côté ou de l'autre pour inclure telle étoile et laisser telle autre dans la constellation voisine.

B) Galilée (1564-1642)

Galilée (en italien : **Galileo Galilei**), né à Pise le 15 février 1564 et mort à Arcetri, près de Florence, le 8 janvier 1642 (à 77 ans), est un mathématicien, géomètre, physicien et astronome italien. Parmi ses réalisations techniques, il a inventé la lunette astronomique, perfectionnement de la découverte hollandaise d'une lunette d'approche, pour procéder à des observations rapides et précoces qui ont bouleversé les

fondements de l'astronomie. Cet homme de sciences s'est ainsi posé en défenseur de l'approche modélisatrice copernicienne de l'Univers, proposant d'adopter l'héliocentrisme et les mouvements satellitaires. Ses observations et généralisations se sont alors heurtées aux critiques des philosophes partisans d'Aristote, proposant un géocentrisme stable, une classification des corps et des êtres, un ordre immuable des éléments et une évolution réglée des substances, ainsi qu'aux théologiens jésuites de l'Église catholique romaine, soucieux alors de préserver les fondements de la transsubstantiation. Galilée, qui ne disposait pas de preuves directes du mouvement terrestre, a parfois oublié la prudence qui lui était prônée par ses protecteurs religieux. Dans le domaine des mathématiques, ce « langage décrivant la nature » qu'il appelait de ses vœux pour « l'écriture mathématique du livre de l'Univers » en 1623 dans son opus sur les comètes, si Galilée n'a pas contribué à faire progresser l'algèbre, il a tout de même produit des travaux inédits et remarquables sur les suites, sur certaines courbes géométriques, sur la prise en compte des infiniment petits... Par ses études et ses nombreuses expériences, parfois uniquement de pensée, sur l'équilibre et le mouvement des corps solides, notamment leur chute, leur translation rectiligne, leur inertie, ainsi que par la généralisation des mesures, en particulier du temps par l'isochronisme du pendule, et la résistance des matériaux, ce chercheur toscan a posé les bases de la mécanique avec la cinématique et la dynamique. Il est considéré depuis 1680 comme le fondateur de la physique, qui s'est imposée comme la première des sciences exactes modernes.

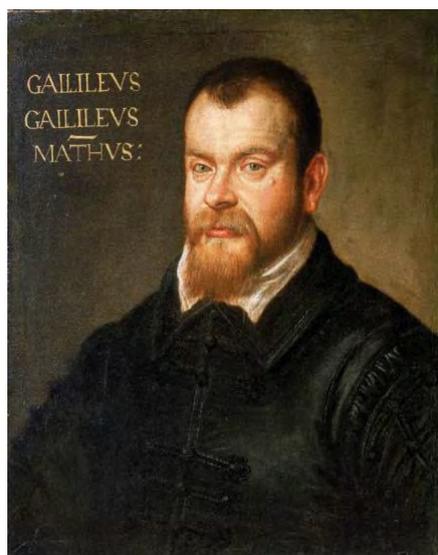
Les premières années

Galileo Galilei (Galilée), fils de Vincenzo Galilei et de Giulia Ammannati, est l'aîné de leurs sept enfants. La famille florentine appartient à la petite noblesse et gagne sa vie dans le commerce à Pise. Vincenzo Galilei, son père, est luthiste, musicien, chanteur, et auteur en 1581 d'un *Dialogue de la musique moderne*. Il participe à des controverses sur la théorie musicale.

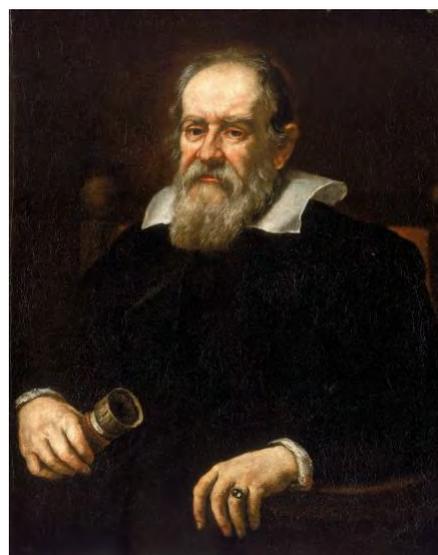
L'enfance



La maison natale (au milieu) de Galilée à Pise



Galileo Galilei par Domenico Tintoretto en 1605



Portrait de Galileo Galilei par Giusto Sustermans en 1636

Galilée fait preuve très tôt d'une grande habileté manuelle : Enfant, il s'amuse à réaliser les maquettes de machines qu'il a aperçues. Il est éduqué chez ses parents jusqu'à l'âge de 10 ans. Ceux-ci déménagent alors à Florence et le confient à un prêtre du voisinage, Jacopo Borghini, pendant deux ans. Par la suite, Galilée entre au couvent de Santa Maria de Vallombrosa et y reçoit une éducation religieuse. Poussé au noviciat par ses maîtres, il ne poursuit pas sa carrière ecclésiastique très longtemps : son père, profitant d'une maladie des yeux de son fils, le ramène à Florence en 1579. Deux ans plus tard, Vincenzo Galilei l'inscrit à l'université de Pise où il suit des cours de médecine (sur les traces d'un de ses glorieux ancêtres, le *magister* (maître) Galilaeus de Galilaeis), (1370 - ~1450), mais sans y porter de l'intérêt. Il revient à Florence en 1585 sans avoir fini ses études ni obtenu son diplôme.

La découverte de sa vocation

Dès 1583, Galilée est initié aux mathématiques par Ostilio Ricci, un ami de la famille, élève de Tartaglia. Bien que Ricci soit un savant peu renommé, il a l'habitude, rare à l'époque, de lier la théorie à la pratique par l'expérience. Il a également été influencé par Giovanni Battista Benedetti, autre élève de Tartaglia.

À l'âge de dix-neuf ans, il découvre, en chronométrant à l'aide de son pouls, la régularité des oscillations des lustres de la cathédrale de Pise. De retour chez lui, il compare les oscillations de deux pendules et travaille à la loi de l'isochronisme des pendules, dont le néerlandais Christian Huygens découvre la vraie loi de l'isochronisme rigoureux (nécessitant l'invention d'un autre mouvement isochrone : le pendule cycloïdal alors que le pendule simple de Galilée n'est pas parfaitement isochrone) en décembre 1659, étape de la découverte d'une nouvelle science : la mécanique galiléenne.

Galilée observe la régularité du mouvement du pendule simple et le décrit en 1638. Il affirme que la période d'un pendule ne dépend pas de sa masse mais de sa longueur et il énonce la loi sur les périodes : les carrés des périodes d'oscillations sont proportionnels aux longueurs des pendules. La formule s'énonce de nos jours sous la forme suivante (l étant la longueur du pendule, g la gravité et T la période, la première formule de la physique) :

$$T = 2\pi \left(\sqrt{\frac{l}{g}} \right)$$

Galilée entame d'abord des études de médecine, mais n'ayant aucun goût pour la médecine et la philosophie aristotélicienne, il abandonne. Grâce à Euclide, qui l'éblouit, Galilée réoriente ses études vers les mathématiques. Dès lors, il se réclame de Pythagore, de Platon et d'Archimède et contre le géocentrisme aristotélicien. Dans le courant humaniste, il rédige aussi un pamphlet féroce sur le professorat de son temps. Deux ans plus tard, il est de retour à Florence sans diplôme, mais avec de grandes connaissances et une grande curiosité scientifique.



Le Pendule pesant de Galilée à la Cathédrale (Duomo) de Pise

De Florence à Pise (1585-1592)

Galilée commence par démontrer plusieurs théorèmes sur le centre de gravité de certains solides dans son *Theoremata circa centrum gravitatis solidum*, et entreprend en 1586 de reconstituer la balance hydrostatique d'Archimède ou Bilancetta. En même temps, il poursuit ses études sur les oscillations du pendule pesant et invente le pulsomètre. Cet appareil permettait d'aider à la mesure du pouls et fournissait un étalon de temps, qui n'existait pas à l'époque. Il débute aussi ses études sur la chute des corps. Depuis son retour de Pise, l'ancien étudiant fréquente à Florence les cercles d'amateurs de musique, chers à son père, excellent théoricien de la musique. Il y donne des conférences érudites sur l'art et la littérature. Le fils Galilée est ainsi remarqué par le cénacle du cardinal del Monte, qui, en politique péninsulaire, soutient le parti français. En 1588, il est invité par l'*Accademia Fiorentina* (Académie florentine) à présenter deux leçons sur *la forme, le lieu et la dimension de l'Enfer de Dante*. Parallèlement à ses activités diversifiées, il cherche vainement un emploi de professeur de géométrie ou de mathématique dans une université. La mort de son père tombé gravement malade en 1589 rend cette quête cruciale car il doit désormais subvenir seul aux besoins de sa famille. Il cherche alors à rencontrer, entre autres grands personnages avec lesquels il correspond déjà, le père jésuite Christophorus Clavius, sommité des mathématiques au Collège pontifical. Il obtient aussi l'aide du mathématicien Guidobaldo del Monte. Ce dernier recommande Galilée au grand-duc Ferdinand I^{er} de Toscane, qui le nomme à la chaire de mathématique de l'Université de Pise pour 60 écus d'or par an, une misère. Sa leçon inaugurale a lieu le 12 novembre 1589.

En 1590 et 1591, il découvre la cycloïde et s'en sert pour dessiner des arches de ponts. Il expérimente également sur la chute des corps et rédige son premier ouvrage de mécanique, le *De motu* (Le mouvement). La réalité même de ces « expériences » est aujourd'hui largement mise en doute et serait une invention de son premier biographe, Vincenzo Viviani. Ce volume contient des idées nouvelles pour l'époque, mais il expose encore, bien évidemment pour s'adapter aux contraintes de l'enseignement officiel, les principes de l'école aristotélicienne et le système de Ptolémée. Galilée les enseigne d'ailleurs longtemps, après avoir été convaincu de la justesse du système copernicien, mais faute de preuves tangibles.

L'université de Padoue (1592-1610)

En 1592, Galilée part enseigner à l'université de Padoue, où il reste 18 ans. Le départ de Pise, après seulement trois ans, s'expliquerait par un différend l'opposant à un fils du grand-duc Ferdinand I^{er} de Toscane. Ce nouveau poste à Padoue lui a été proposé par l'entremise du cardinal Del Monte. Il est sensiblement mieux rémunéré, et accompagné de la jouissance d'une maison qu'il n'hésitera pas à louer en partie à ses étudiants étrangers, quitte à cohabiter avec eux pendant les cours. Par ailleurs, il offre de grandes facilités de recherche. Padoue, qui possède des artisans des métaux et du bois, experts en fonderie et en menuiserie, appartenait à la puissante République de Venise, ce qui garantissait à Galilée une grande liberté intellectuelle, l'Inquisition y étant très peu puissante. Même si Giordano Bruno avait été livré à l'Inquisition par les patriciens de la République, Galilée pouvait effectuer ses recherches sans trop de soucis. Venise est alors très réputée pour son arsenal, et tout son savoir-faire artisanal et technique, ce qui offre à Galilée de grandes possibilités. Détail qui a son importance, la grande cité républicaine est également célèbre pour la qualité de son industrie verrière, protégée dans les îlots de Murano. Il logera modestement dans la ville, la « Sérénissime », avec sa compagne et ses enfants.

Galilée enseigne la mécanique appliquée, les mathématiques, l'astronomie et l'architecture militaire. Il installe une fructueuse coopération avec les ateliers de fondeurs et de menuisiers, ce qui lui permet de mettre au point avec ses étudiants des expériences sur le mouvement des solides. Il professait alors publiquement le système de Ptolémée, n'osant pas encore s'insurger contre les idées admises, bien qu'ayant déjà adopté personnellement le système de Copernic. Ses leçons de mécanique avaient un succès considérable, qui dépassait largement le cadre de la République de Venise, et le Père Mersenne publiera en France en 1634 *les Mécaniques de Galilée*.

Depuis la mort de son père en 1591, Galilée doit subvenir aux besoins de la famille : il se porte notamment caution pour la dot, dix fois supérieure à son salaire, d'une de ses sœurs et devra jusqu'à la fin de sa vie aider financièrement son frère Michelagnolo Galilei ou supporter l'instabilité croissante de sa mère (endetté, il savait qu'en rentrant à Florence il serait mis en prison). Galilée est accaparé par ses tâches d'enseignement

et de recherche : il donne de nombreux cours particuliers à de riches étudiants qu'il héberge chez lui. Mais il est piètre gestionnaire et seule la vente d'instruments scientifiques (thermomètre de Galilée, balance hydrostatique) et surtout l'aide financière de ses protecteurs et amis lui permettent d'équilibrer ses comptes. En 1593, il rédige le *Trattato di Forticazioni* (traité des fortifications) et le *Trattato di Meccaniche* (traité de mécanique) à l'intention de ses étudiants de cours particuliers. Les travaux de Galilée permettent une meilleure efficacité de l'artillerie lourde (ils établissent qu'un canon doit être pointé à 45° pour avoir sa portée maximale) et ne font l'objet d'aucune contestation. En 1597, il améliore et fabrique un compas de proportion, le *compas géométrique et militaire*, ancêtre de la règle à calcul, qui connaît un grand succès commercial. Il n'en rédige le mode d'emploi que neuf ans plus tard. En 1599, Galilée participe à la fondation de l'*Accademia dei Ricovrati* (Académie des découvertes) avec l'abbé Federico Cornaro. La même année, il fait venir le mécanicien Marc'Antonio Mazzoleni dans l'atelier au rez-de-chaussée de son logis pour y fabriquer et vendre, d'après ses propres plans, des instruments scientifiques. La même année, Galilée rencontre Marina Gamba, une jeune Vénitienne issue de famille modeste, avec laquelle il entretient une liaison jusqu'en 1610 (ils ne sont pas mariés et ne vivent pas sous le même toit). En 1600, naît Virginia, sa première fille, suivie par sa sœur Livia en 1601, puis un fils, Vincenzo, en 1606. Après la séparation (non conflictuelle) du couple, Galilée se charge des enfants. Il placera plus tard ses filles au couvent à Arcetri. Sa fille aînée, Virginie, deviendra sœur Marie Céleste car fille d'un scientifique fasciné par les étoiles. Selon Guillaume Libri, Galilée expérimente vers 1602-1603, un appareil destiné à observer les variations de température ou thermoscope et en montre les effets à Castelli. Mais la primauté de la découverte ne peut être attestée.

L'année 1604

1604 est *annus mirabilis*, une année exceptionnelle pour Galilée, qui atteint ses 40 ans :

- En juillet, il teste sa pompe à eau dans un jardin de Padoue.
- En octobre, il découvre la loi du mouvement uniformément accéléré, qu'il associe à une loi des vitesses erronées.
- En décembre, il débute son observation d'une nova connue depuis le 10 octobre au moins. Il consacre 5 leçons sur le sujet le mois suivant, et en février 1605 il co-publie *Dialogo de Cecco di Ronchitti in Perpuosito de la Stella Nova* avec Girolamo Spinelli. Bien que l'apparition d'une nouvelle étoile, et sa disparition soudaine, entre en totale contradiction avec la théorie établie de l'inaltérabilité des cieux, Galilée reste encore aristotélicien en public, mais il est déjà fermement copernicien en privé. Il attend la preuve irréfutable sur laquelle s'appuyer pour dénoncer l'aristotélisme.

Reprenant ses études sur le mouvement, Galilée montre que les projectiles suivent, dans le vide, des trajectoires paraboliques.

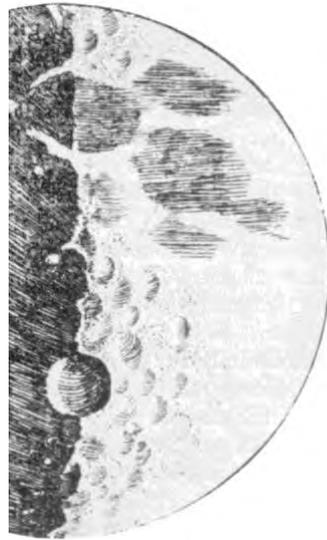
La lunette - Perfectionnement de la lunette

De 1606 à 1609

En 1606, Galilée et deux de ses amis tombent malades le même jour d'une même maladie infectieuse. Seul Galilée survit, mais il restera perclus de rhumatismes pour le restant de ses jours. Dans les deux années qui suivent, le savant étudie les armatures d'aimants. On peut encore voir ses travaux au musée d'Histoire de la Science de Florence.



*Réplique d'une lunette astronomique de Galilée
au Griffith Observatory*



*Dessin de la lune par Galilée, publié dans "
Sidereus Nuncius" en 1610 (à gauche), à droite
une photo ancienne de la Lune*

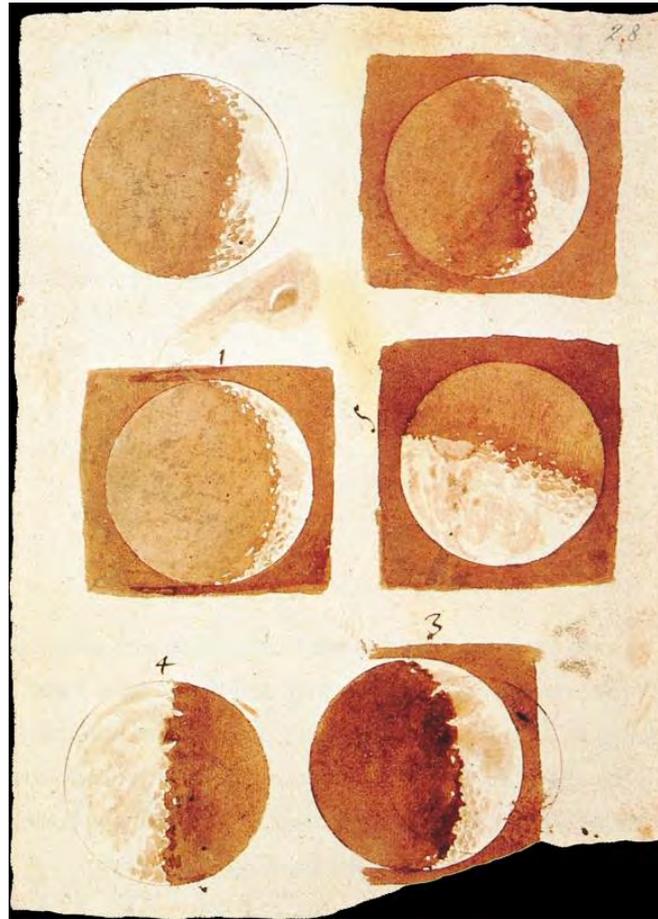
En mai 1609, Galilée reçoit de Paris une lettre du Français Jacques Badovere, l'un de ses anciens étudiants, qui lui confirme une rumeur insistante : l'existence d'une longue-vue conçue par l'opticien hollandais Hans Lippershey en 1608, et permettant de voir les objets éloignés. Fabriquée communément en Hollande et en France. Galilée, qui ne donne plus de cours à Cosme II de Médicis, construit sa première lunette. Galilée améliore cette lunette simple en appliquant des principes élémentaires d'optique et la transforme en lunette astronomique, envisageant d'observer les étoiles invisibles à l'œil nu. Son instrument déforme toujours sensiblement les objets, mais les grossit surtout de manière linéaire jusqu'à trente fois. Galilée est aussi le seul à l'époque en Europe à réussir à obtenir une image droite grâce à l'utilisation d'une lentille divergente en oculaire.

Cette invention marque un tournant dans la vie de Galilée car elle le transforme de physicien en astronome. Et il croit d'emblée, sans construire une théorie prudente de l'instrument d'optique fabriqué, qu'il observe bien la réalité. Il se précipite vers l'observation des corps célestes et extrapole déjà leurs mouvements. Le 21 août 1609, il termine sa deuxième lunette assez proche de la longue-vue hollandaise et conçue pour l'observation maritime ou nocturne. Elle grossit huit ou neuf fois. Il la présente au sénat de Venise. La démonstration a lieu au sommet du Campanile de la place Saint-Marc. Les spectateurs sont enthousiasmés : sous leurs yeux, Murano, située à 2,5 km, semble être à environ 300 m seulement. Galilée offre son instrument et en lègue les droits à la République de Venise, très intéressée par les applications militaires de l'objet. En récompense, Galilée est confirmé à vie à son poste de Padoue et ses gages sont doublés. Il est enfin libéré de ses difficultés financières.

Galilée lui-même reconnaissait, en mars 1610, que, sur plus de 60 lunettes qu'il avait construites, quelques-unes seulement étaient adéquates. De nombreux témoignages, y compris celui de Kepler, confirment la médiocrité des premiers instruments.

Montées sur de simples tubes en bois ou de carton, les lentilles conçues par Galilée permirent pour la première fois à l'œil humain d'étudier de près la Lune, les taches solaires et les planètes et leurs satellites. Plusieurs des lunettes astronomiques construites par Galilée sont exposées au Musée Galilée (Florence).

L'observation de la Lune



Phases de la Lune dessinées par Galilée en 1616

Pendant l'automne, Galilée continue à développer sa lunette. En novembre, il fabrique un instrument qui grandit une vingtaine de fois. Il prend le temps de tourner sa lunette vers le ciel. Très vite, en observant les phases de la Lune, il découvre, quelques mois après Thomas Harriot, que cet astre n'est pas parfait comme le voulait la théorie aristotélicienne.

La physique aristotélicienne, qui faisait autorité à l'époque, distinguait deux mondes :

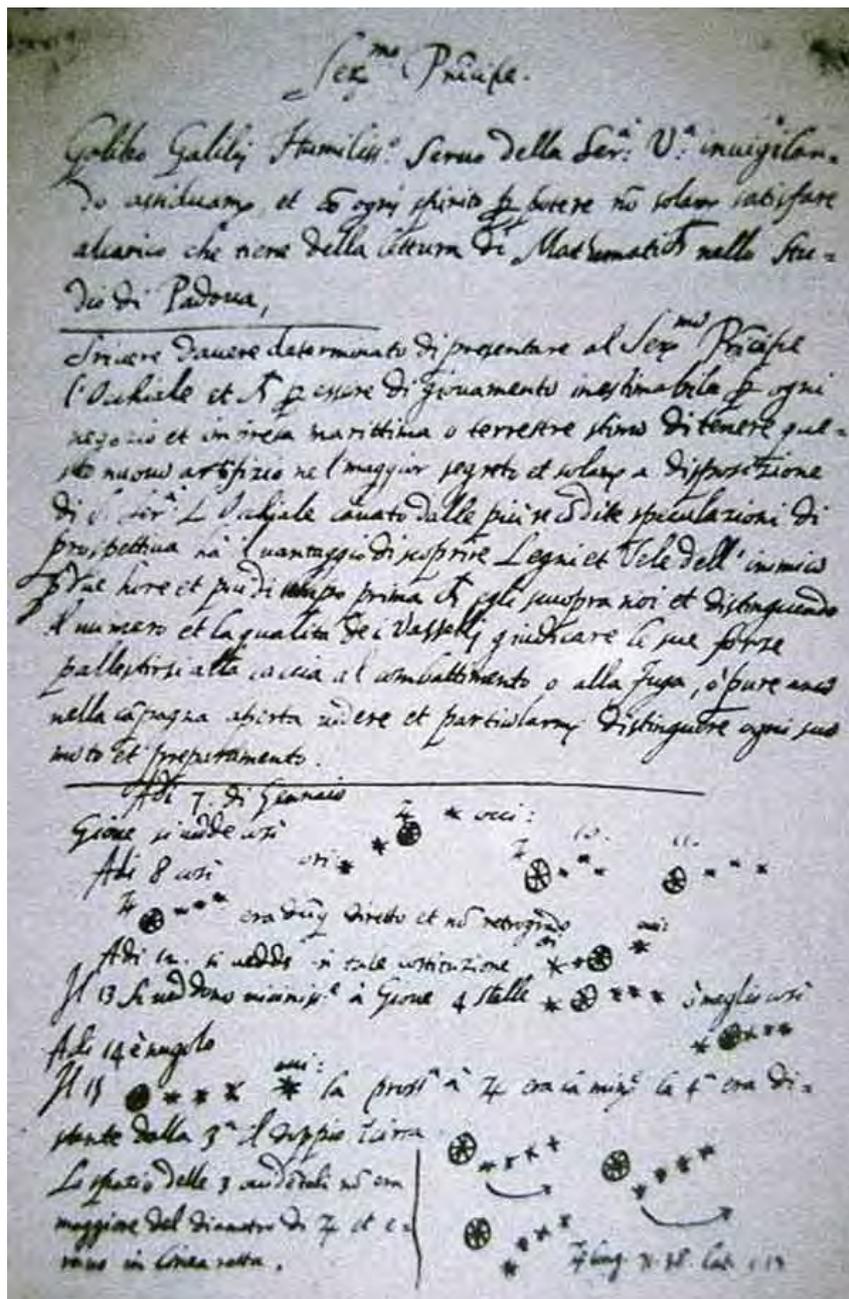
- le monde « sublunaire » : comprenant la Terre et tout ce qui se trouve entre la Terre et la Lune; dans ce monde tout est imparfait et changeant;
- le monde « supralunaire » : qui part de la Lune et s'étend au-delà. Dans cette zone, il n'existe plus que des formes géométriques parfaites (des sphères) et des mouvements réguliers immuables (circulaires).

Galilée, quant à lui, observa une zone transitoire entre l'ombre et la lumière, le *terminateur*, qui n'était en rien régulière, ce qui par conséquent invalidait la théorie aristotélicienne. Galilée en déduit l'existence de montagnes sur la Lune et estime même leur hauteur à 7 000 mètres, davantage que la plus haute montagne connue à l'époque. Il faut dire que les moyens techniques de l'époque ne permettaient pas de connaître l'altitude des montagnes terrestres sans fantaisie. Quand Galilée publie son *Sidereus Nuncius* (Messager Céleste), il pense que les montagnes lunaires sont plus élevées que celles de la Terre, bien qu'en réalité elles soient équivalentes.

La tête dans les étoiles

Notes manuscrites historiques de Galilée décrivant pour la première fois sa découverte des lunes de Jupiter en 1610. En quelques semaines, il découvre la nature de la Voie lactée, dénombre les étoiles de la constellation d'Orion et constate que certaines étoiles visibles à l'œil nu sont en fait des amas d'étoiles. Il étudie également les taches solaires sur le soleil. Le 7 janvier 1610, Galilée fait une découverte capitale : il remarque trois petites étoiles à côté de Jupiter. Après quelques nuits d'observation, il découvre qu'il y en a une quatrième et qu'elles accompagnent la planète. Ce sont les satellites visibles de Jupiter, qu'il nommera

plus tard les étoiles Médicées ou astres médicéens, en l'honneur de ses protecteurs, la Famille des Médicis, Grands Ducs de Toscane.



Notes manuscrites historiques de Galilée décrivant pour la première fois sa découverte des lunes de Jupiter en 1610

Les satellites de Jupiter (aujourd'hui appelés *lunes galiléennes*) seront baptisés Callisto, Europe, Ganymède et Io par Simon Marius, qui en revendiquera également la découverte plusieurs années après. Pour Galilée, qui est alors le seul à expliquer leurs mouvements relatifs, Jupiter et ses satellites sont un modèle du système solaire. Grâce à eux, il pense pouvoir démontrer que les « *orbes de cristal* » d'Aristote n'existent pas et que tous les corps célestes ne tournent pas autour de la Terre. C'est un coup très rude porté aux aristotéliens. Il corrige aussi certains coperniciens qui prétendent que tous les corps célestes tournent autour du Soleil (sauf la Lune). Le 12 mars 1610, Galilée publie à Venise les résultats de ses premières observations stellaires dans l'ouvrage *Sidereus Nuncius* (Le Messager céleste), dont les 500 exemplaires seront épuisés en quelques jours. Le professeur d'université de Padoue, qui affiche son origine florentine, accède à la célébrité en quelques semaines. Les cours italiennes ne parlent que de ses observations astronomiques et veulent rencontrer le noble homme de science florentin.

Désireux de retourner avec tous les honneurs dans sa Toscane natale et à Florence, Galilée rebaptise les satellites de Jupiter qui sont pour quelque temps les «astres médicéens», en l'honneur de Cosme II de Médicis, son ancien élève et grand-duc de Toscane qui vient de lui octroyer une généreuse pension à vie et lui proposer un poste officiel de géomètre du duché de Florence. Galilée a hésité entre *Cosmica sidera* et *Medicea sidera*. Le jeu de mots « Cosmica = Cosme » est évidemment volontaire et c'est seulement après la première impression qu'il retient la deuxième dénomination. La petite famille de Galilée - il a une femme et trois enfants vivant à Venise - est désormais protégée du besoin. Le 10 avril, il fait observer ces astres à la cour de Toscane. C'est le triomphe. Le même mois, il donne trois cours sur le sujet à Padoue. Toujours en avril, Johannes Kepler offre son soutien à Galilée. L'astronome allemand ne confirme pas vraiment cette découverte puisqu'il n'a pas encore eu accès à la lunette, il offre seulement une dissertation-discussion (enthousiaste pour son aspect copernicien) sur la pertinence du petit ouvrage de Galilée. C'est la *Dissertatio cum Nuncio Sidereo* où même la question de l'impact sur les fondements de l'astrologie est abordée (ces nouvelles planètes invalident-elles l'astrologie de la tradition ? Question remise au goût du jour depuis 2006 avec l'actualité des planétoïdes plutoniens et le déclassement de Pluton). En septembre 1610, Kepler publie sa *Narratio*, un compte-rendu court et précis de l'observation des compagnons de Jupiter : c'est là qu'il crée le néologisme "satellite" (garde du corps en latin). En effet, si l'on ajoutait des "planètes" au système solaire, son système des 5 solides (1596, *Mysterium Cosmographicum*) serait invalidé... À noter que Galilée ne lui fit jamais parvenir une seule lunette, et ce malgré son soutien officiel en tant qu'Astronome Impérial. L'observation des satellites de Jupiter n'a pu avoir lieu que par l'emprunt d'une lunette (qu'il eut à disposition une ou deux nuits seulement). Galilée, en effet, s'est toujours méfié des écrits képlériens faisant une part belle à l'astrologie, à l'Écriture Sainte (Kepler est protestant et théologien de formation) ou, à partir de 1609, à des ellipses et des forces dans le système solaire. Galilée qualifia même de puérile l'idée d'une attraction mutuelle entre les eaux des mers et la Lune... rappelant trop la symbolique astrologique.

Observations à Florence, présentation à Rome

Le 10 juillet 1610, Galilée quitte Venise pour Florence. Malgré l'avis de ses amis Fra Paolo Sarpi et Sagredo, qui craignent que sa liberté ne soit bridée, il a, en effet, accepté le poste de *Premier Mathématicien* de l'Université de Pise (sans charge de cours, ni obligation de résidence) et celui de *Premier Mathématicien* et *Premier Philosophe* du grand-duc de Toscane.

Le 25 juillet 1610, Galilée tourne sa lunette astronomique vers Saturne et découvre ses anneaux. C'est seulement 50 ans plus tard et avec des instruments plus puissants que Christian Huygens en comprendra la nature. Le mois suivant, Galilée trouve une astuce pour observer le Soleil à la lunette et découvre les taches solaires. Il en donne une explication satisfaisante. En septembre 1610, poursuivant ses observations, il découvre les phases de Vénus. Pour lui, c'est une nouvelle preuve de la vérité du système copernicien, car s'il est facile d'interpréter ce phénomène grâce à l'hypothèse héliocentrique, il est beaucoup plus difficile de le faire à l'aide de l'hypothèse géocentrique.

Il est invité le 29 mars 1611 par le cardinal Maffeo Barberini (futur Urbain VIII) à présenter ses découvertes au Collège pontifical de Rome et à la jeune Académie des Lyncéens. Galilée reste dans la capitale pontificale un mois complet, durant lequel il reçoit tous les honneurs. L'Académie des Lyncéens notamment, lui réserve un accueil enthousiaste et l'admet en tant que 6^e membre. Dorénavant, le lynx de l'Académie ornera le frontispice de toutes les publications de Galilée. Le 24 avril 1611, des professeurs de sciences du Collège romain (dirigé par les jésuites) répondent à la demande d'information de Bellarmin. Cette réponse, signée par Christophorus Clavius, un éminent mathématicien, confirme au cardinal Bellarmin que les observations de Galilée sont exactes. Se limitant à leur domaine et aux questions posées les savants se gardent bien de confirmer ou d'infirmer les conclusions que le Florentin en a tirées. Galilée s'empresse de faire connaître cette opinion. Il retourne à Florence le 4 juin.

Galilée attaqué et condamné par les autorités - L'opposition s'organise

Les partisans de la théorie géocentrique sont devenus les ennemis acharnés de Galilée et les attaques contre lui ont commencé dès la parution du *Sidereus Nuncius*. Ils ne peuvent pas se permettre de perdre la face et ne veulent pas voir leur science remise en question. De plus, les méthodes de Galilée, basées sur l'observation et l'expérience plutôt que sur l'autorité des partisans des théories géocentriques (qui

s'appuyaient sur le prestige d'Aristote), sont en opposition complète avec les leurs, à tel point que Galilée refuse d'être comparé à eux. D'abord, ce ne sont que des escarmouches. Mais Sagredo écrit tout de même à Galilée, fraîchement arrivé à Florence : « La puissance et la générosité de votre prince (le grand-duc de Toscane) permettent d'espérer qu'il saura reconnaître votre dévouement et votre mérite; mais dans les mers agitées des cours, qui peut éviter d'être, je ne dirai pas coulé, mais au moins durement secoué par les rafales furieuses de la jalousie ? »

La première flèche vient de Martin Horky, disciple du professeur Giovanni Antonio Magini et ennemi de Galilée. Cet assistant publie en juin 1610, sans consulter son maître, un pamphlet contre le *Sidereus Nuncius*. Hormis les attaques personnelles, son argument principal est le suivant : « Les astrologues ont fait leurs thèmes astrologiques en tenant compte de tout ce qui bougeait dans les cieux. Donc les astres médicéens ne servent à rien et, Dieu ne créant pas de choses inutiles, ces astres ne peuvent pas exister ». Il est ridiculisé par les partisans de Galilée, qui répondent que ces astres servent à une chose : faire enrager Horky. Devenu la risée de toute l'université, Horky est finalement chassé par son maître : Giovanni Antonio Magini ne tolère pas un échec aussi cuisant. Au mois d'août, un certain Sizzi tente le même genre d'attaque avec le même genre d'arguments, sans plus de succès. Une fois les observations de Galilée confirmées par le Collège romain, les attaques changent de nature. Ludovico Delle Combe attaque sur le plan religieux en demandant si Galilée compte interpréter la Bible pour la faire s'accorder à ses théories. À cette époque en effet, et avant les travaux exégétiques du XIX^e siècle, le psaume 93 (92) laissait entendre une cosmologie géocentrique (dans la ligne : « Tu as fixé la Terre ferme et immobile »).

Les attaques se font plus violentes

Galilée, de retour à Florence, est inattaquable sur le plan astronomique. Ses adversaires vont donc critiquer sa théorie des corps flottants. Galilée prétend que la glace flotte parce qu'elle est plus légère que l'eau, alors que les aristotéliens pensent que c'est dans sa nature de flotter. (Physique quantitative et mathématique de Galilée contre physique qualitative d'Aristote). L'attaque aura lieu durant un repas à la table du grand-duc Cosme II de Toscane au mois de septembre 1611. Galilée est opposé aux professeurs de Pise et notamment à Delle Combe lui-même, durant ce qu'on appelle la « *bataille des corps flottants* ». Galilée réalise l'expérience et sort victorieux de l'échange. Quelques mois plus tard, il en tirera un opuscule où il présente sa théorie.

En dehors de ces démêlés, Galilée continue ses recherches. Son système de détermination des longitudes par l'observation de la position des satellites de Jupiter est proposé à l'Espagne par l'ambassadeur de Toscane. En 1612, il entreprend une discussion avec « Apelles latens post tabulam » (pseudonyme du jésuite Christoph Scheiner), un astronome allemand, au sujet des taches solaires. Apelles défend l'incorruptibilité du Soleil en arguant que les taches sont en réalité des amas d'étoiles entre le Soleil et la Terre. Galilée démontre que les taches sont soit à la surface même du Soleil, soit si proches qu'on ne peut mesurer leur altitude. L'Académie des Lyncéens publiera cette correspondance le 22 mars 1613 sous le titre d'*Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti*. Scheiner finira par adhérer à la thèse galiléenne.

Le 2 novembre 1612, la querelle reprend. Le dominicain Niccolo Lorini, professeur d'histoire ecclésiastique à Florence, prononce un sermon résolument opposé à la théorie de la rotation de la Terre. Sermon sans conséquence particulière, mais qui marque les débuts des attaques religieuses. Les opposants utilisent le passage biblique (*Josué* 10, 12-14) dans lequel, à la prière de Josué, Dieu arrête la course du Soleil et de la lune, comme arme théologique contre Galilée. En décembre 1613, le professeur Benedetto Castelli, ancien élève de Galilée et un de ses collègues à Pise, est sommé par la grande-duchesse douairière Christine de Lorraine de prouver l'orthodoxie de la doctrine copernicienne. Galilée viendra en aide à son disciple en lui écrivant une lettre le 21 décembre 1613 sur le rapport entre science et religion, affirmant que dans le domaine des phénomènes physiques, l'Écriture Sainte n'a pas de juridiction. La grande-duchesse est rassurée, mais la controverse ne faiblit pas. Galilée cependant, continue ses travaux. Du 12 au 15 novembre, il reçoit Jean Tarde, à qui il présente son microscope et ses travaux d'astronomie. En 1614, il fait la connaissance de Jean-Baptiste Baliani, physicien génois, qui sera son ami et correspondant pendant de longues années.

La censure de la thèse copernicienne (1616)

Le 20 décembre, le dominicain Tommaso Caccini attaque très violemment Galilée à l'église Santa Maria Novella. Le 6 janvier 1615, un copernicien, le carme Paolo Foscarini, publie une lettre traitant positivement de l'opinion des pythagoriciens et de Copernic sur la mobilité de la Terre. Il envisage le système copernicien en tant que réalité physique. La controverse prend une telle ampleur que le cardinal Bellarmin, pourtant favorable à Galilée, est obligé d'intervenir le 12 avril. Il écrit une lettre à Foscarini où, en l'absence de réfutation concluante du système géocentrique, il condamne sans équivoque la thèse héliocentrique. Tout en reconnaissant l'intérêt pratique, pour le calcul astronomique, du système de Copernic, il déclarait formellement imprudent de l'ériger en vérité physique. En réaction, vers avril 1615, Galilée écrit à Christine de Lorraine une longue lettre dans laquelle il développe admirablement ses arguments en faveur de l'orthodoxie du système copernicien. Galilée y explique que « *l'intention du Saint-Esprit est de nous enseigner comment on doit aller au Ciel, et non comment va le ciel* ». On y voit par ailleurs les passages des Écritures qui posaient problème d'un point de vue cosmologique. Cette lettre est, elle aussi, largement diffusée. Pour Galilée, c'était accepter le déplacement du débat du terrain scientifique au terrain de la Foi. Galilée se rend à Rome pour se défendre contre les calomnies et surtout essayer d'éviter une interdiction de la doctrine copernicienne. Mais il lui manque la preuve irréfutable de la rotation de la Terre pour appuyer ses plaidoiries. Son intervention arrive trop tard : Lorini, par lettre de dénonciation, avait déjà prévenu Rome de l'arrivée de Galilée et le Saint-Office avait déjà commencé l'instruction de l'affaire. Cherchant toujours une preuve du mouvement de la Terre et pour répondre aux objections du cardinal Bellarmin, Galilée pense la trouver dans le phénomène des marées. Le 8 février 1616, il envoie sa théorie des marées au cardinal Orsini. Cette théorie rappelle la relation entre les marées et la position apparente de la lune, qui tourne moins vite autour de la Terre (29,57 jours) que la Terre n'est supposée tourner sur elle-même (1 jour). Malheureusement, Galilée ne peut expliquer ainsi qu'une marée par jour alors qu'il en est couramment observé deux, parfois avec un peu de décalage sur l'heure astronomique (qui ne sera expliqué que plus tard par la Dynamique des fluides). Elle reste en revanche compatible avec le principe d'inertie admis par Galilée. L'influence de la lune sur les marées avait déjà été soulignée par Kepler, mais Galilée n'en avait pas alors tenu compte. Il faudra attendre l'année 1728 et les observations de Bradley sur l'aberration de la lumière pour avoir une première preuve directe du mouvement de la Terre par rapport aux étoiles.

L'intransigeance de Galilée, qui refuse l'équivalence des hypothèses copernicienne et ptoléméenne, a sans doute précipité les événements. De fait, sur la question de la translation de la Terre et de sa rotation sur elle-même, les arguments décisifs n'ont été acquis qu'au début du XIX^e siècle. L'équivalence des hypothèses était la conclusion rationnelle justifiée pour l'époque; et non l'affirmation d'une réalité physique telle que soutenue par Galilée. L'historien Maurice Clavelin a cherché à justifier le refus de l'équivalence des hypothèses de Galilée. Bellarmin, qui demande à Galilée, de présenter l'héliocentrisme comme une hypothèse, le fait sur la base d'un géocentrisme admis et considéré comme vrai. Quand Galilée refuse ce compromis, il refuse que l'astronomie conserve un rôle de subordonné par rapport à la philosophie naturelle traditionnelle (d'Aristote), alors partie intégrante de la théologie catholique. Galilée revendique le statut de philosophe et considère que, non seulement Dieu a donné aux hommes les sens et la raison pour découvrir la vraie constitution du monde, mais que ses observations minent l'astronomie de Ptolémée et justifie son adhésion à l'astronomie copernicienne. Malgré deux mois passés en de nombreuses tractations, Galilée est convoqué le 16 février 1616 par le Saint-Office pour l'examen des propositions de censure. Les 25 février et 26 février 1616, la censure est ratifiée par l'Inquisition et par le pape Paul V. Galilée n'est pas inquiété personnellement mais est prié d'enseigner sa thèse en la présentant comme une hypothèse. Cet arrêté s'étend à tous les pays catholiques. Des rumeurs circulent que Galilée a abjuré et reçu une sévère pénitence. À sa demande Bellarmin lui donne un certificat (26 mai 1616) clarifiant que rien de tel n'eut lieu. Il lui a été simplement notifié que l'héliocentrisme, étant contraire aux Saintes Écritures, ne peut à ce stade être défendu ou enseigné. **Progrès des thèses de Galilée**

Cette affaire a beaucoup éprouvé Galilée. Ses maladies reviennent le tourmenter pendant les deux années suivantes et son activité scientifique se réduit. Il reprend seulement son étude de la détermination des longitudes en mer. Ses deux filles entrent dans les ordres. En 1618, on observe le passage de trois comètes, phénomène qui relance la polémique sur l'incorruptibilité des cieux.



Galilée face au tribunal de l'Inquisition Catholique Romain peint au XIX^e siècle par Joseph-Nicolas Robert-Fleury

En 1619, le père jésuite Orazio Grassi publie *De tribus cometis anni 1618 disputatio astronomica*. Il y défend le point de vue de Tycho Brahe sur les trajectoires elliptiques des comètes. Galilée riposte d'abord par l'intermédiaire de son élève Mario Guidicci qui publie en juin 1619 *Discorso delle comete* où il développe une théorie personnelle sur les comètes, allant jusqu'à émettre l'hypothèse de phénomènes météorologiques d'illusions d'optique. En octobre, Orazio Grassi attaque Galilée dans un pamphlet plus sournois : aux considérations scientifiques se mêlent des allusions religieuses considérées comme malveillantes et dangereuses au temps de la Contre-Réforme. Cependant, Galilée, encouragé par son ami le cardinal Barberini (futur pape Urbain VIII) et soutenu par l'Académie des Lyncéens, y répondra avec ironie dans *Il Saggiatore* (ou *L'Essayeur*); ouvrage qui est considéré comme un « chef-d'œuvre de l'art polémique ». Grassi, l'un des plus grands savants jésuites, est ridiculisé et envoie une lettre anonyme à l'Inquisition, mais un théologien de l'Inquisition conclut à un non-lieu.

Lorsque Peiresc, ami et ancien élève de Galilée, apprend qu'il est inquiété, il envoie une lettre au cardinal Barberini. Entre-temps, Galilée a repris son étude des satellites de Jupiter. Malheureusement des difficultés techniques l'obligent à abandonner le calcul de leurs éphémérides. Nonobstant, Galilée se voit couvert d'honneurs en 1620 et 1622. Le 28 août 1620, le cardinal Maffeo Barberini adresse à son ami le poème *Adulatio Perniciosa* qu'il a composé à son honneur. Le 20 janvier 1621, Galilée devient consul de l'Accademia fiorentina. Le 28 février, Cosme II, le protecteur de Galilée, meurt subitement. En 1622, à Francfort, paraît une *Apologie de Galilée* rédigée par Tommaso Campanella en 1616. Un défenseur bien encombrant, car Campanella est déjà convaincu d'hérésie. Le 6 août 1623, l'ami de Galilée, le cardinal Maffeo Barberini est élu Pape sous le nom de Urbain VIII. Le 3 février 1623 Galilée reçoit l'autorisation de publier son *Saggiatore* qu'il dédie au nouveau Pape. L'ouvrage paraît le 20 octobre 1623. Ce sont d'abord les qualités polémiques (et littéraires) de l'ouvrage qui assureront son succès à l'époque. Il n'en demeure pas moins qu'en quelques mois et dans une atmosphère de grande effervescence culturelle, Galilée devient en quelque sorte le porte-drapeau des cercles intellectuels romains en rébellion contre le conformisme intellectuel et scientifique imposé par les Jésuites.

Dans cet ouvrage, il énonce la mathématisation de la physique : « La philosophie est écrite dans cet immense livre qui se tient toujours ouvert devant nos yeux, je veux dire l'univers, mais on ne peut le comprendre si l'on ne s'applique d'abord à en comprendre la langue et à connaître les caractères dans lesquels il est écrit. Il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et autres figures géométriques, sans le moyen desquels il est humainement impossible d'en comprendre un mot ». Les années suivantes sont assez calmes pour Galilée malgré les attaques des aristotéliens. Il en profite pour perfectionner son microscope composé (septembre 1624). En 1626, Galilée poursuit ses recherches sur l'armature de l'aimant. Il reçoit aussi la visite d'Élie Dodati, qui apportera les copies de ses manuscrits à Paris. En 1628, Galilée, âgé de 64 ans, tombe gravement malade et manque de mourir en mars. L'année suivante, ses adversaires tentent de le priver de l'allocation qu'il reçoit de l'Université de Pise, mais la manœuvre échoue.

Le *Dialogue* et la condamnation de 1633



L'ouvrage Dialogue sur les deux grands systèmes du monde demandé à Galilée par le Pape Urbain VIII vers 1620 et publié en 1632

Dans les années 1620, après la censure de ses thèses, Galilée passe un mois à Rome où il est reçu plusieurs fois par le pape Urbain VIII qui a pour lui une grande amitié. Il lui expose le plan de l'étude commanditée par celui-ci *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, ouvrage devant présenter de façon neutre les avantages comme les inconvénients du système de Ptolémée et du système de Copernic. En effet, le pape qui apprécie Galilée ne veut pas qu'il fasse figurer des arguments si peu convaincants notamment à propos de sa théorie sur les marées, conseil dont Galilée ne tiendra pas compte. Jusqu'en 1631 Galilée consacre son temps à l'écriture du *Dialogo* qui sera le triomphe de ses idées et à tenter de les faire admettre par la censure. L'ouvrage est achevé d'imprimer en février 1632. Les yeux de Galilée commencent à le trahir en mars et avril.

Le 21 février 1632, Galilée, protégé par le pape Urbain VIII et le grand-duc de Toscane Ferdinand II de Médicis, petit-fils de Christine de Lorraine, fait paraître à Florence son dialogue des *Massimi sistemi*, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, où il raille sensiblement le géocentrisme de Ptolémée comme il l'avait fait avec son expérience de pensée concernant les affirmations erronées d'Aristote sur la

chute des corps. Galilée, qui veut écraser ses adversaires, publie son ouvrage en demandant l'imprimatur, c'est-à-dire l'approbation de l'Église. Il piège M^{gr} Riccardi, maître du Sacré Palais, qui avait la mission d'inspecter le dialogue. En effet, lors de l'inspection, M^{gr} Riccardi n'a connaissance que de la préface et de la conclusion dans lesquelles Galilée ne dévoile pas ses vraies intentions. Le style du *Dialogue* cause à la fois révolution et scandale. Le *Dialogue* se déroule à Venise sur quatre journées entre trois interlocuteurs : Filippo Salviati, Florentin partisan de Copernic, Giovan Francesco Sagredo, Vénitien éclairé mais sans *a priori*, et Simplicio, piètre défenseur de la physique aristotélicienne, personnage caricatural qui ne pose que des questions idiotes, en lequel les clercs de l'Université, voire Urbain VIII lui-même, se seraient (peut-être) sentis visés. Toutefois, lorsqu'on lui reprocha le caractère ostensiblement péjoratif du nom, Galilée répondit qu'il s'inspirait de Simplicius de Cilicie. L'Église se sent obligée de réagir d'autant plus qu'elle considère qu'on lui a, en quelque sorte volé son imprimatur, puisque le texte imprimé ne correspond pas au texte présenté à M^{gr} Riccardi. De plus, Galilée écrit son livre en italien et non en latin, langue scientifique. Il souhaite ainsi toucher un large public.

Le pape lui-même ne peut qu'avaliser le reproche des adversaires de Galilée à qui il avait demandé une présentation *neutre* des deux théories, pas un plaidoyer en faveur du seul Copernic. Le Pape trahi ne lui en veut pas pour avoir tourné en dérision ses propres paroles, mais pour le manque de preuves de sa théorie. D'autant qu'à cette époque les systèmes se déduisent par simple transformation mathématique l'un de l'autre : seul le pendule de Foucault apportera, bien plus tard, une *preuve* de la rotation de la Terre sur elle-même, sa rotundité étant acquise depuis Aristote sur lequel l'Église comme l'Université s'alignaient alors (Terre sphérique et immobile au centre de l'univers) et par l'expédition de Magellan bien avant la naissance de Galilée.

Le pape se sent alors doublement trahi, ce qui le pousse à prendre une décision stricte. Il doit de même agir vite car avec le succès du livre, Galilée devient un personnage très médiatisé, déchaînant la colère de ses opposants. Malgré cela, le Pape Urbain VIII veut éviter à Galilée de comparaître devant les juges mais la Commission refuse. Galilée est donc à nouveau convoqué par le Saint-office, le 1^{er} octobre 1632. Ce qui lui est reproché n'est pas sa thèse elle-même, mais le détournement d'une mission commanditée, ce qui justifie des sanctions pénales. Son livre est en outre ouvertement pro-copernicien, bafouant l'interdit de 1616 (la mise à l'index de ces thèses ne sera levée qu'en 1757). Malade, il ne peut se rendre à Rome qu'en février 1633. Les interrogatoires se poursuivent jusqu'au 21 juin où une menace de torture est même évoquée sur ordre du pape; Galilée cède.

Le 22 juin 1633, au couvent dominicain de Santa-Maria, la sentence est rendue : « Il est paru à Florence un livre intitulé *Dialogue des deux systèmes du monde de Ptolémée et de Copernic* dans lequel tu défends l'opinion de Copernic. Par sentence, nous déclarons que toi, Galilée, t'es rendu fort suspect d'hérésie, pour avoir tenu cette fausse doctrine du mouvement de la Terre et repos du Soleil. Conséquemment, avec un cœur sincère, il faut que tu abjures et maudisses devant nous ces erreurs et ces hérésies contraires à l'Église. Et afin que ta grande faute ne demeure impunie, nous ordonnons que ce *Dialogue* soit interdit par édit public, et que tu sois emprisonné dans les prisons du Saint-Office ». Il prononce également la formule d'abjuration que le Saint-office avait préparée : « Moi, Galiléo, fils de feu Vincenzo Galilei de Florence, âgé de soixante-dix ans, ici traduit pour y être jugé, agenouillé devant les très éminents et révérends cardinaux inquisiteurs généraux contre toute hérésie dans la chrétienté, ayant devant les yeux et touchant de ma main les Saints Évangiles, jure que j'ai toujours tenu pour vrai, et tiens encore pour vrai, et avec l'aide de Dieu tiendrai pour vrai dans le futur, tout ce que la Sainte Église catholique et apostolique affirme, présente et enseigne. Cependant, alors que j'avais été condamné par injonction du Saint-office d'abandonner complètement la croyance fausse que le Soleil est au centre du monde et ne se déplace pas, et que la Terre n'est pas au centre du monde et se déplace, et de ne pas défendre ni enseigner cette doctrine erronée de quelque manière que ce soit, par oral ou par écrit; et après avoir été averti que cette doctrine n'est pas conforme à ce que disent les Saintes Écritures, j'ai écrit et publié un livre dans lequel je traite de cette doctrine condamnée et la présente par des arguments très pressants, sans la réfuter en aucune manière; ce pour quoi j'ai été tenu pour hautement suspect d'hérésie, pour avoir professé et cru que le Soleil est le centre du monde, et est sans mouvement, et que la Terre n'est pas le centre, et se meut. J'abjure et maudis d'un cœur sincère et d'une foi non feinte mes erreurs. [...] ».

Le fameux aparté attribué à Galilée *E pur si muove!* (ou *Eppur si muove* - « Et pourtant elle tourne ») est probablement apocryphe : cette rétractation l'aurait en effet immédiatement fait passer pour relaps aux yeux de l'Église, et aurait pu lui faire risquer le bûcher, ou même perdre tout espoir de commutation de sa peine. Le texte de la sentence est diffusé largement : à Rome le 2 juillet, le 12 août à Florence. La nouvelle arrive en Allemagne fin août, aux Pays-Bas Espagnols en septembre. **Les décrets du Saint-Office ne seront jamais publiés en France mais, prudemment et pour éviter la controverse, René Descartes renonce à faire paraître son traité du monde et de la lumière qui soutient et valide l'héliocentrisme. Ce traité sera publié en 1664, 14 ans après sa mort.** Beaucoup (y compris René Descartes qui diffère puis annule par crainte la publication de son traité de science), à l'époque, pensèrent que Galilée était la victime d'une cabale des Jésuites qui se vengeaient ainsi de l'affront subi par Orazio Grassi dans le *Saggiatore*. Les positions du théologien liégeois Libert Froidmont (de l'Université de Louvain) s'efforcent d'éclairer en détail l'équivoque de la condamnation de Galilée. La condamnation de Galilée est immédiatement commuée par le Pape en résidence surveillée. Le scientifique n'est donc jamais allé en prison et continua même à percevoir les revenus de deux bénéfices ecclésiastiques que le souverain pontife lui avait octroyés. La deuxième sanction : la récitation des psaumes de la pénitence une fois par semaine pendant un an, sera effectuée par sa fille religieuse carmélite.

La fin

D'abord assigné à résidence chez l'archevêque Piccolomini à Sienne, il obtient finalement d'être relégué chez lui, à Florence dans sa villa d'Arcetri, la *Villa le Gioiello* (« Villa le petit joyau »), non loin de ses filles au couvent. Au début, personne n'est autorisé à se rendre chez le « prisonnier d'Arcetri » mais cette interdiction s'assouplit ensuite, ce qui lui permet de recevoir quelques visites et lui fournit l'occasion de faire passer la frontière à quelques ouvrages en cours de rédaction. Ces livres paraissent à Strasbourg et à Paris en traduction latine. En 1636, Louis Elzevier reçoit une ébauche des *Discours sur deux sciences nouvelles* de la part du maître florentin. C'est le dernier livre qu'écrira Galilée, ouvrage où le scientifique a consigné les découvertes d'où est née la dynamique moderne ; il y établit les fondements de la mécanique en tant que science et marque ainsi la fin de la physique aristotélicienne. Il tente aussi de poser les bases de la résistance des matériaux, avec moins de succès. Il finira ce livre de justesse, car le 4 juillet 1637, il perd l'usage de son œil droit. Le 2 janvier 1638, Galilée perd définitivement la vue. Par chance, Dino Peri a reçu l'autorisation de vivre chez Galilée pour l'assister avec le père Ambrogetti qui prendra note de la sixième et dernière partie des *Discours*. Cette partie ne paraîtra qu'en 1718. L'ouvrage complet paraît en juillet 1638 à Leyde (Pays-Bas) et à Paris. Il est lu par les grands esprits de l'époque. Descartes par exemple enverra ses observations à Mersenne, l'éditeur parisien. Il restera à Arcetri jusqu'à sa mort, entouré de ses disciples (Viviani, Torricelli, Vincenzo Reinieri, Dino Peri, etc.), travaillant à l'astronomie et autres sciences. Fin 1641, Galilée envisage d'appliquer l'oscillation du pendule aux mécanismes d'horloge. Quelques jours plus tard, le 8 janvier 1642, Galilée s'éteint à Arcetri, une petite colline au sud de Florence, à l'âge de 77 ans. Sur l'ordre du grand-duc de Toscane, son corps est inhumé religieusement à Florence le 9 janvier dans le caveau familial de la Basilique Santa Croce de Florence. L'Église refusant que lui soit édifié un monument funéraire, un mausolée sera érigé en son honneur le 13 mars 1736.

Postérité : de l'incompréhension des scientifiques au réexamen de l'affaire Galilée par l'Église

Le procès de Galilée, spécialement pour sa présentation jugée non-neutre de l'ouvrage qui lui avait été commandé *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (1633), a eu des retombées considérables sur la méthode scientifique, tant la méthode expérimentale que théorique, mais aussi indirectement sur la philosophie et d'autres domaines de la pensée. En philosophie, on vit ainsi apparaître des courants de pensée rationalistes (Descartes), et empiriques (voir Francis Bacon, mais aussi Robert Boyle).

XVII^e siècle : réactions des scientifiques

La théorie de l'héliocentrisme souleva d'abord des questions sur l'aristotélisme (Terre fixe au centre de l'univers) et sur la métaphysique, qui entraînèrent des réactions des scientifiques :

- Descartes se lança dans un projet philosophique (cogito) et, dans les *Méditations sur la philosophie première* (1641), dénonça la philosophie d'Aristote et la scolastique.

- Blaise Pascal rejoignit le courant janséniste et participa avec une équipe de Port-Royal à une traduction de la Bible sous la direction de Lemaître de Sacy, qui fut la seule traduction de la Bible en français au XVII^e siècle.

XVIII^e siècle : la confirmation scientifique et la levée de l'interdit par le pape Benoît XIV

En 1728, James Bradley fut le premier à prouver scientifiquement, par l'explication qu'il donna à « l'aberration de la lumière », la rotation de la Terre autour du Soleil.

Le pape Benoît XIV autorisa les ouvrages sur l'héliocentrisme dans la première moitié du XVIII^e siècle, et ceci en deux temps :

- En 1741, devant la preuve optique de l'orbitation de la Terre faite par Bradley en 1728, il fit donner par le Saint-office l'imprimatur à la première édition des œuvres complètes de Galilée, avec cependant l'ajout du fait que le mouvement de la Terre est *supposé*. Ce geste constitua une révision implicite des sentences de 1616 et 1633, même si celles-ci ne furent pas abrogées.
- En 1757, les ouvrages favorables à l'héliocentrisme furent à nouveau autorisés, par un décret de la Congrégation de l'Index, qui retira ces ouvrages du catalogue des livres interdits.

Dans le *Discours préliminaire de l'Encyclopédie*, d'Alembert critique sévèrement l'Inquisition pour la condamnation de Galilée : « Un tribunal devenu puissant dans le midi de l'Europe, dans les Indes, dans le Nouveau Monde, mais que la foi n'ordonne point de croire, ni la charité d'approuver, ou plutôt que la religion réprouve, quoique occupé par ses ministres, et dont la France n'a pu s'accoutumer encore à prononcer le nom sans effroi, condamna un célèbre astronome pour avoir soutenu le mouvement de la terre, et le déclara hérétique (...). C'est ainsi que l'abus de l'autorité spirituelle réunie à la temporelle forçait la raison au silence ; et peu s'en fallut qu'on ne défendit au genre humain de penser ». Dans l'article « Astronomie », l'Encyclopédie indique : « Les opinions de Galilée lui attirèrent les censures de l'inquisition de Rome : mais ces censures n'ont pas empêché qu'on ne l'ait regardé comme un des plus grands génies qui ait paru depuis longtemps ».

XIX^e siècle : les travaux d'exégèse s'intensifient

Les protestants travaillèrent sur l'Ancien Testament, tandis que les catholiques s'attelèrent au Nouveau Testament. Dix-neuf traductions de la Bible en français parurent au XIX^e siècle et, à la fin du siècle, le pape Léon XIII indiqua les règles à adopter pour les études bibliques (encyclique *Providentissimus Deus* de 1893). Avant cela, en 1820, l'Europe se relevant à peine du choc causé par la Révolution française et l'Empire napoléonien, le chanoine Settele s'apprête à publier ses *Éléments d'optique et d'astronomie* et se voit opposer un refus d'imprimer. C'est la dernière manifestation de l'interdiction des écrits coperniciens. L'auteur injustement censuré s'adresse au pape Pie VII, dont il reçoit dès 1822 une sentence favorable. « L'affaire Galilée » est devenue au XIX^e siècle un « cheval de bataille du positivisme et plus encore d'un anticléricalisme à peine masqué » qui a créé l'image d'un Galilée persécuté et jeté en prison par l'Église obscurantiste alors qu'il n'a pas passé une heure en « cachot indigne » et que sa peine est relativement bénigne par rapport à celle de Giordano Bruno. Cette bataille oublie aussi que Galilée, pourtant adepte de la méthode scientifique, avance avec la même intransigeance qu'il avait manifestée pour démontrer les erreurs d'Aristote sur la chute des corps des assertions scientifiques sans toujours les fonder. Provocateur et sûr de lui, il traite ses adversaires de « pygmées mentaux », « idiots stupides », « à peine dignes du nom d'êtres humains » et s'aliène progressivement les jésuites qui ont pourtant, dès 1611, confirmé ses découvertes scientifiques.

XX^e siècle : l'Église reconnaît (enfin) ses erreurs

L'Église catholique a reconnu lors du Concile Vatican II que les interventions de certains chrétiens dans l'Histoire dans le domaine scientifique étaient indues, en mentionnant Galilée. Les papes modernes ont rendu hommage au grand savant qu'était Galilée. De nouvelles traductions de la Bible sont apparues dans la deuxième moitié du XX^e siècle, tenant compte des études bibliques (exégèse et herméneutique) lancées par les papes Léon XIII et Pie XII (qui ne s'est pas offusqué de la théorie du Big Bang, voir Pie XII et le Big Bang). En 1979 et en 1981, le pape Jean-Paul II, récemment élu, chargea une commission d'étudier la controverse ptoléméo-copernicienne des XVI^e-XVII^e siècle. Jean-Paul II considéra qu'il ne s'agissait pas d'une réhabilitation, le tribunal qui a condamné Galilée n'existant plus. Celle-ci est d'ailleurs implicite après

les autorisations données par Benoît XIV en 1741 et en 1757. Le 31 octobre 1992, Jean-Paul II a reconnu clairement, lors de son discours aux participants à la session plénière de l'Académie pontificale des sciences, les erreurs de certains théologiens du XVII^e siècle dans l'affaire : « Ainsi la science nouvelle, avec ses méthodes et la liberté de recherche qu'elle suppose, obligeait les théologiens à s'interroger sur leurs propres critères d'interprétation de l'Écriture. La plupart n'ont pas su le faire ». « Paradoxalement, Galilée, croyant sincère, s'est montré plus perspicace sur ce point que ses adversaires théologiens. "Si l'écriture ne peut errer, écrit-il à Benedetto Castelli, certains de ses interprètes et commentateurs le peuvent, et de plusieurs façons". On connaît aussi sa lettre à Christine de Lorraine (1615) qui est comme un petit traité d'herméneutique biblique. » Jean-Paul II a souligné que le grand savant avait eu une « intuition de physicien de génie » en comprenant pourquoi seul le soleil pouvait avoir fonction de centre du monde, tel qu'il était alors connu, c'est-à-dire comme système planétaire.

XXI^e siècle

En octobre 2005, le livre du cardinal Paul Poupard sur l'affaire Galilée est publié. En janvier 2008, 67 professeurs de l'Université de Rome « La Sapienza », soutenus par des étudiants, s'en prennent au pape Benoît XVI, au point que ce dernier doit renoncer à participer à la cérémonie d'inauguration de l'année universitaire à laquelle il avait été convié. Ces professeurs reprochent au pape sa position sur l'affaire Galilée telle qu'elle était apparue dans un discours prononcé par lui à Parme en 1990, dans lequel il s'appuie sur l'interprétation du philosophe des sciences Paul Feyerabend jugeant la position de l'Église d'alors plus rationnelle que celle de Galilée. Une manifestation en soutien du pape réunit 100 000 fidèles sur la place Saint-Pierre le 20 janvier 2008. Le 15 février 2009, soit 445 ans jour pour jour après la naissance de Galilée, le président du Conseil pontifical pour la culture célèbre une messe en l'honneur de Galilée en la basilique Sainte-Marie-des-Anges-et-des-Martyrs. L'année 2009 a été déclarée « Année Mondiale de l'Astronomie » (AMA09 ou IYA09 en anglais) par l'UNESCO, l'organisme des Nations Unies pour l'Éducation, les Sciences et la Culture. Elle coïncide avec le 400^e anniversaire des premières observations faites avec une lunette astronomique, par Galilée.

Galilée est et restera dans l'histoire comme l'un des deux ou trois plus grands génies de l'astronomie, bien que ses travaux soient allés bien au-delà de cette science. Véritable inventeur de la géométrie, de la lunette astronomique et peut-être du microscope. Il a découvert de nombreuses choses dont les satellites de Jupiter, les phases de Vénus, les anneaux de Saturne en 1612 (même s'il n'a pas compris ce qu'il voyait, faute d'avoir eu des instruments optiques suffisamment puissants), les taches solaires, etc. Il a travaillé sur les marées, les mouvements des solides, la chute des corps, les pendules et les aimants. Il a vu Neptune en 1612 mais n'a pas compris que c'était une planète qui ne sera découverte qu'en 1846 (234 ans plus tard !). On lui pardonnera quelques petites erreurs, comme son analyse sur les comètes et quelques autres.

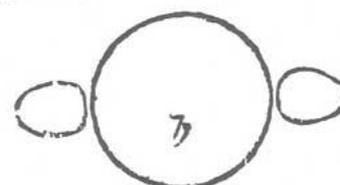


Galilée observe en 1612 à son insu la (future) planète Neptune

Galileo Galilei



Saturnus verò hac figura visus est.



Signature de Galilée - dessins de Saturne (1612)

C) Johannes Kepler (1571-1630)

Johannes Kepler, né le 27 décembre 1571 à Weil der Stadt et mort le 15 novembre 1630 à Ratisbonne dans l'électorat de Bavière, est un astronome célèbre pour avoir étudié l'hypothèse héliocentrique de Nicolas Copernic, affirmant que la Terre tourne autour du Soleil et surtout pour avoir découvert que les planètes ne tournent pas autour du Soleil en suivant des trajectoires circulaires parfaites mais des trajectoires elliptiques. Assistant de Tycho Brahe pendant l'année qui précéda la mort de celui-ci (1600-1601), il hérite des innombrables observations et notes de son maître.

Œuvres scientifiques

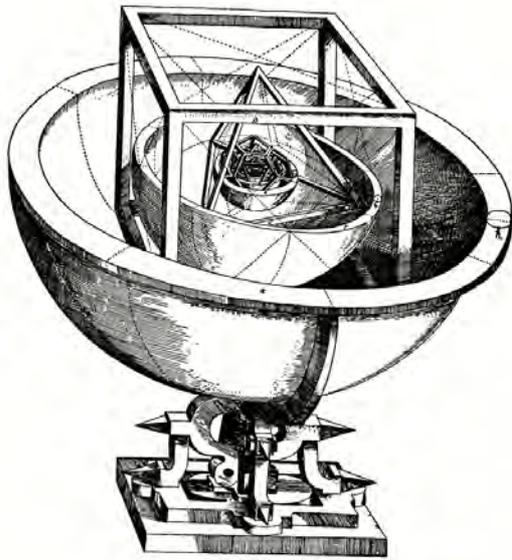
Kepler a découvert les trois relations mathématiques, aujourd'hui dites lois de Kepler, qui régissent les mouvements des planètes sur leur orbite. Les deux premières sont publiées en 1609 dans un livre intitulé *Astronomia Nova*. La troisième survient seulement en 1618, et quantifie le rapport entre longueur du demi-grand axe et période de révolution. Ces relations sont fondamentales car elles furent plus tard exploitées par Isaac Newton pour mettre au point sa théorie de la gravitation universelle. Dans son *Astronomia Nova* il entrevoyait déjà la loi de la gravitation universelle. Il explique à propos de la pesanteur et de l'attraction terrestre que "deux corps voisins et hors de la sphère d'attraction d'un troisième corps s'attireraient en raison directe de leur masse." Pour mieux se faire comprendre, il écrit le premier livre de science-fiction, *Somnium*. Il veut montrer les problèmes posés par l'attraction et la pesanteur en imaginant un voyage de la Terre à la Lune par deux personnages: la violence du départ, la diminution progressive de la pesanteur qui à la fin s'annule (l'état d'apesanteur de nos jours !) puis l'attraction croissante de la Lune qui reste néanmoins plus faible que sur La Terre.

Il fonde une science nouvelle, nommée par lui la "dioptrique" et qui deviendra l'optique en synthétisant en 1604, puis en 1611, les principes fondamentaux de l'optique moderne comme la nature de la lumière, la chambre obscure, les miroirs (plans et courbes), les lentilles ou la réfraction.

Le *Mysterium Cosmographicum*

En 1596, il publie son premier ouvrage, *Mysterium Cosmographicum*, fruit de ses premières recherches sur la structure de l'Univers. Il voit dans les lois qui régissent les mouvements des planètes un message divin adressé à l'Homme. Dans ce livre, où il affirme sa position copernicienne, il se donne pour objectif de répondre à trois questions portant sur le **nombre de planètes**, leur **distance** au Soleil et enfin leur **vitesse**. Dans son livre, il développe une théorie des polyèdres réguliers permettant de construire un modèle de l'Univers. Kepler remarqua que l'on pouvait intercaler entre les orbites des six planètes connues à l'époque (de Mercure à Saturne) les cinq solides de Platon. Ces derniers étant des polyèdres réguliers, ils étaient parmi les solides ceux qui approchaient le plus la perfection divine de la sphère. Leur utilisation dans l'architecture de l'Univers s'accordait bien avec la grandeur de la création divine. Le nombre de ces solides impliquait le **nombre de planètes** : cinq intervalles, donc six planètes. Mais ces polyèdres expliquaient également, par leur disposition, les proportions des orbites planétaires (les **distances** relatives des planètes au Soleil) : chaque solide était inscrit dans l'orbite d'une planète et circonscrit à l'orbite de la planète immédiatement inférieure. L'emboîtement était constitué ainsi : le cube entre les orbites de Saturne et de Jupiter, le tétraèdre entre celui de Jupiter et celui de Mars, puis le dodécaèdre, entre ce dernier et celui de la Terre, suivi par l'icosaèdre englobant l'orbite de Vénus, lui-même circonscrit à l'octaèdre, qui entourait enfin l'orbite de Mercure.

Pour prendre en compte la variabilité de la distance des planètes au Soleil (due pour Kepler comme pour Copernic à l'excentricité et aux épicycles de chacune d'entre elles), l'astronome donne à chaque orbite une épaisseur correspondant à la différence entre la distance maximale et la distance minimale de la planète au Soleil. Il est à noter que l'épaisseur des orbites amène Kepler à transformer de façon décisive le système copernicien en un système réellement héliocentrique : en effet, Copernic prenait comme référence des mouvements planétaires le centre du grand orbite (l'orbite terrestre), et non le Soleil, un peu à l'écart du fait de l'excentricité de l'orbite terrestre. Pour affecter à l'orbite de la Terre, comme à toutes les autres, une épaisseur, Kepler déplace la référence des mouvements planétaires dans le Soleil.



*Le modèle géométrique du système solaire selon Kepler, d'après *Mysterium Cosmographicum* (1596)*



Copie d'un portrait perdu de Johannes Kepler, peint en 1610

Reste la question des **vitesse**s. Pour les expliquer, il attribue au Soleil une «âme» ou «force» motrice qui induit le mouvement des planètes. Il compare celle-ci avec la lumière, qui elle aussi provient du Soleil, et tente de déduire de cette analogie une loi mathématique liant la période de révolution des planètes à leur distance moyenne au Soleil. Mais ses conceptions erronées sur la propagation de la lumière (qu'il corrigera par la suite), sur la dynamique (relations entre forces et mouvements, qui seront établies par Galilée et Newton), ainsi que des erreurs sur les déductions mathématiques des principes qu'il établit, l'amènent à une loi erronée, qu'il lui faudra plus de vingt ans pour rectifier (dans l'*Harmonice mundi*).

La théorie des solides emboîtés, qui amènera plus tard Kepler à découvrir deux nouveaux solides réguliers (voir *Les polyèdres de Kepler-Poinsot*), si elle nous paraît fantaisiste aujourd'hui, a permis à Kepler d'entrer en contact avec ses contemporains Galilée et Tycho Brahe, mathématicien impérial à la cour de Prague. Le premier lui fit part de son enthousiasme pour le soutien des idées coperniciennes qu'il partage également. Le second, tout aussi admiratif, l'invita à travailler à ses côtés.

Mais les apports du *Mysterium Cosmographicum* ne se limitent pas à la riche collaboration qu'il a permise avec l'astronome danois. Ce livre a surtout été apprécié en son temps car il constituait **le premier plaidoyer convaincant pour la théorie copernicienne**, ne se contentant pas, ainsi que Rheticus l'avait fait, de présenter les avantages du système héliocentrique du point de vue mathématique. Kepler, en effet, cherche (et croit avoir trouvé) les **causes** (physiques et métaphysiques) du nombre, de la disposition et des mouvements des planètes. Cette recherche des causes (physiques), que Kepler poursuivra tout au long de sa vie, constitue l'acte fondateur de l'invention d'une nouvelle science : l'*astrophysique*.

Le calcul de l'orbite de Mars

Poursuivi pour ses convictions religieuses et ses idées coperniciennes, Johannes Kepler doit quitter Graz en 1600. Il se réfugie à Prague, invité par l'astronome danois Tycho Brahe pour y devenir son assistant. Les relations entre les deux personnages furent particulièrement houleuses; Tycho Brahe ne croyant pas à l'héliocentrisme de Copernic mais soutenant une autre théorie dans laquelle la Terre est au centre mais les autres planètes tournent autour du Soleil. Kepler voyait en Tycho Brahe un homme plein de richesses (ses mesures étaient les plus précises jamais réalisées) mais qui ne savait les exploiter correctement. Atteint de myopie et de diplopie à la naissance, Kepler s'appuie sur les observations de Brahe pour élaborer ses théories.

Brahe lui demanda de calculer l'orbite précise de Mars, dont les positions suivant ses observations résistaient à toute tentative de modélisation, et s'écartaient notablement (de plusieurs degrés) de celles prévues par les tables. Cette tâche était auparavant assignée à son assistant Longomontanus qui passe alors à l'étude des mouvements de la Lune.

Il pensait accomplir sa tâche en quelques semaines, mais il lui fallut près de six ans pour achever son travail. C'est durant ce travail que Johannes Kepler découvrit les deux premières de ses trois lois fondamentales :

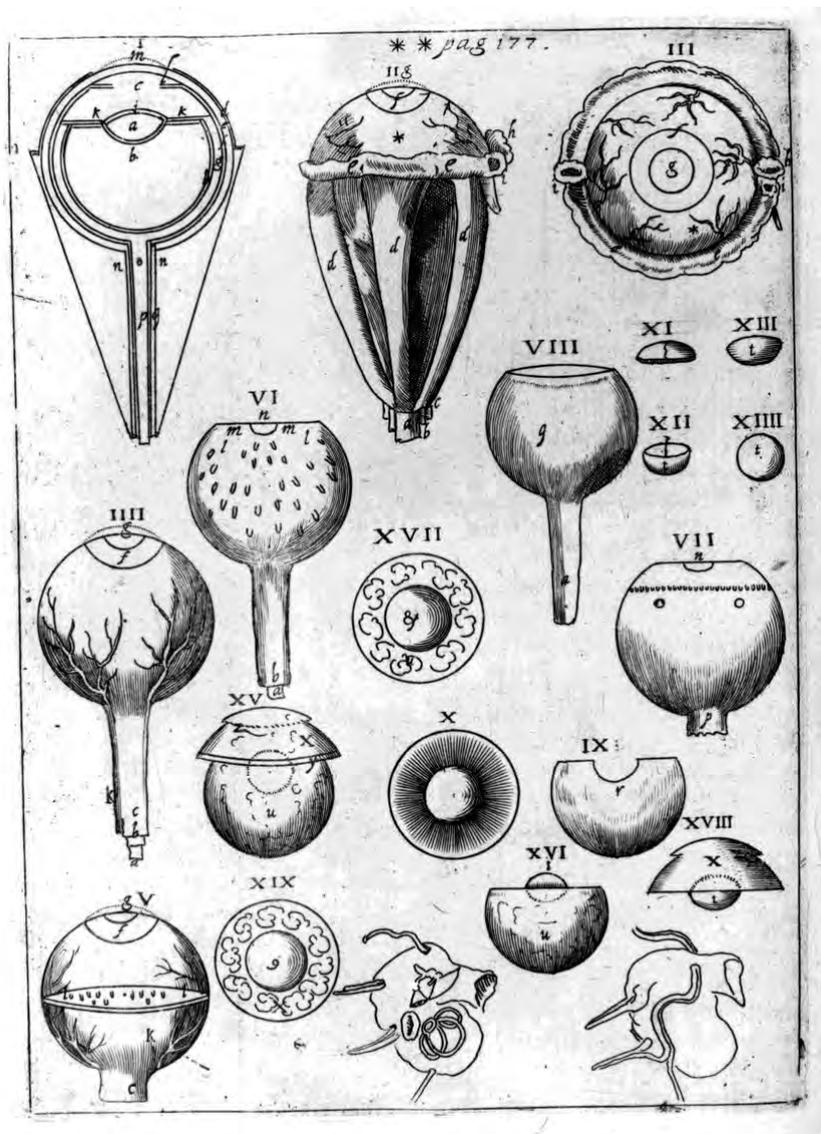
- Les planètes décrivent des trajectoires elliptiques dont le Soleil est un foyer.
- Le mouvement de chaque planète est tel que le segment de droite reliant le Soleil et la planète balaie des aires égales pendant des durées égales.

Ces lois furent publiées dans *Astronomia Nova* en 1609, où Johannes Kepler fut également le premier à émettre l'hypothèse d'une rotation du Soleil sur son axe.

En 1618 viendra sa troisième grande loi :

- Pour toutes les planètes, le rapport entre le cube du demi grand axe de la trajectoire et le carré de la période est le même, cette constante est indépendante de la masse de la planète.

Ce travail fut d'autant plus long que Kepler dut mener en parallèle une étude sur l'optique afin de mieux comprendre et interpréter ses observations, et qu'il était encore trop « conditionné » par les anciennes croyances en astronomie : il doute à plusieurs reprises de la nature circulaire de la trajectoire et pense alors à une ellipse, tout en continuant d'essayer de prouver le contraire, en ressortant de vieilles idées faisant appel à l'utilisation d'épicycles. Les soixante-dix chapitres de l'*Astronomia Nova* comprennent ainsi toutes les démarches scientifiques et erreurs de Kepler qui lui permirent d'aboutir à ses deux premières lois, mais aussi à d'autres conclusions intéressantes comme la nature de la force responsable du mouvement des planètes, force « quasi magnétique », donc physique et non plus divine. À la mort de Tycho Brahe en 1601, Johannes Kepler fut désigné comme mathématicien impérial à la cour de Rodolphe II. Il garda ce statut jusqu'en 1612.



L'optique

Alors qu'il étudie l'orbite de Mars, Kepler voit la nécessité d'étudier également l'optique afin de mieux comprendre certains phénomènes observés tels la réfraction atmosphérique. Dès 1603, il parcourt divers ouvrages sur le sujet dont celui de l'Arabe Alhazen. Kepler rassemble les connaissances de l'époque dans son livre *Astronomia pars Optica*, publié en 1604. Il y explique les principes fondamentaux de l'optique moderne comme la nature de la lumière (rayons, intensité variant avec la surface, vitesse infinie, etc.), la chambre obscure, les miroirs (plans et courbes), les lentilles et la réfraction dont il donne la loi $i = n \times r$, qui est correcte pour de petits angles (la vraie loi — $\sin i = n \times \sin r$ — fut donnée plus tard par Willebrord Snell et René Descartes). Il aborde également le sujet de la vision et la perception des images par l'œil. Il est convaincu que la réception des images est assurée par la rétine et non pas le cristallin comme on le pensait à cette époque, et que le cerveau serait tout à fait capable de remettre à l'endroit l'image inversée qu'il reçoit. En 1610, il prend connaissance de la découverte de quatre satellites autour de Jupiter grâce aux observations de Galilée avec sa lunette astronomique et écrit une lettre de soutien publiée sous le titre de *Dissertatio cum Nuncio Sidereo* (*Conversation avec le messenger des étoiles*), puis après avoir lui-même observé ces satellites, il publie ses observations dans *Narratio de Observatis Quatuor Jovis Satellibus*. C'est d'ailleurs Kepler qui, le premier, dans son ouvrage de 1611, utilisa le mot « satellite » pour désigner les quatre petits astres tournant autour de Jupiter. L'invention récente de la lunette enthousiasme beaucoup Kepler qui, en 1611, écrit un second ouvrage d'optique, *Dioptricae*, reprenant de nombreux thèmes abordés dans l'*Optica* en les approfondissant. Dans ce livre très mathématique, il rassemble 141 théorèmes visant à faire la théorie des lentilles et de leurs associations possibles, dont la théorie de la lunette de Galilée que ce dernier n'avait pas faite.

L'Harmonie du monde

Kepler crut découvrir grâce à des travaux antérieurs que l'Univers était soumis à des lois « harmoniques », faisant un lien entre l'astronomie et la musique. Dans le *Harmonices Mundi*, publié en 1619, il attribue aux planètes un thème musical. Les variations des vitesses de ces planètes sont représentées par les différentes notes composant la musique. Ainsi, il était facile de distinguer les orbites les plus excentriques. Mais c'est aussi dans cet ouvrage en cinq volumes que Kepler énonce sa troisième loi fondamentale : « le carré de la période est proportionnel au cube du demi-grand axe [de l'ellipse] ». Celle-ci découle de ses recherches sur un modèle d'Univers harmonique.

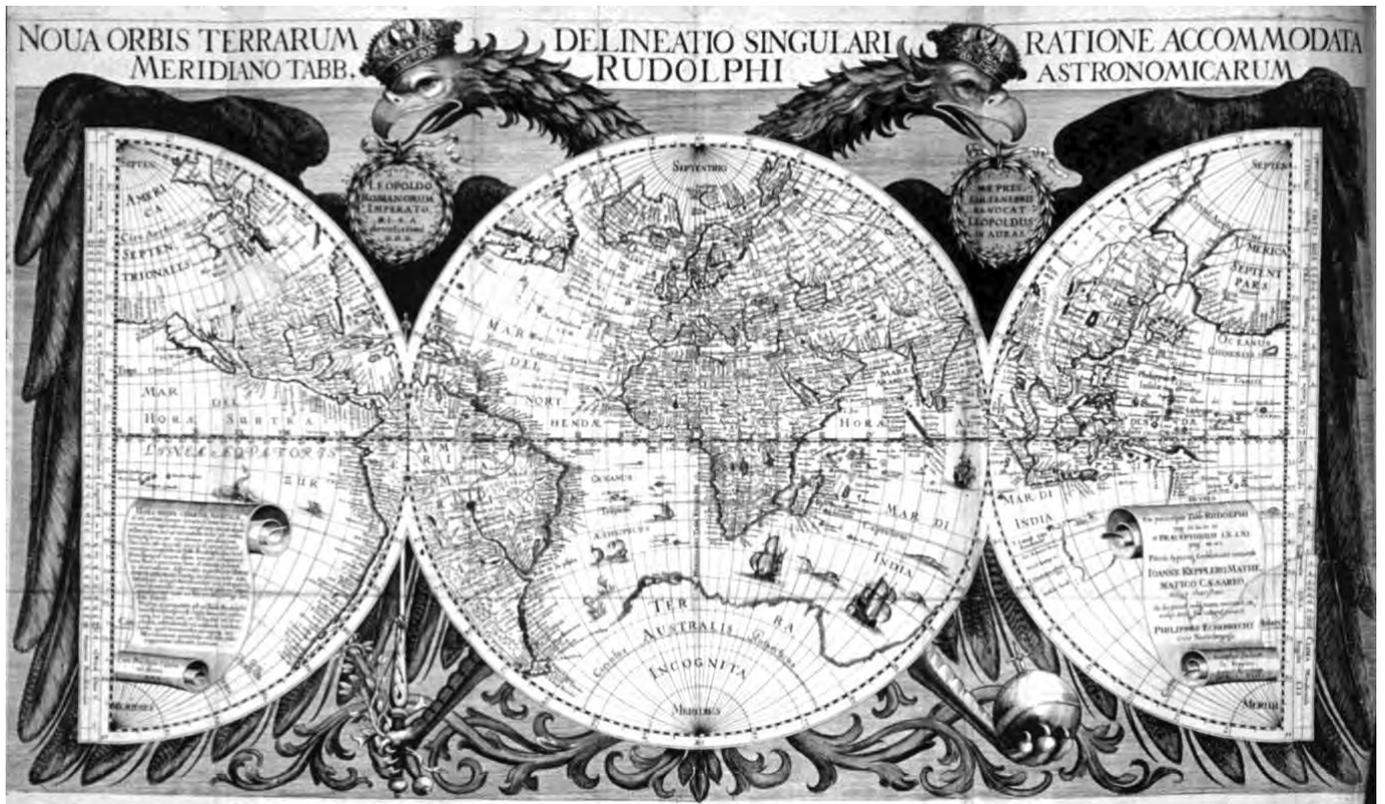
Ses autres travaux

À la suite de l'observation d'une supernova en 1604-1605, il écrira deux ans plus tard *De Stella nova in pede serpentarii*. L'année 1613 est marquée par la publication d'un travail sur la chronologie et l'année de naissance de Jésus de Nazareth, d'abord en allemand, puis en latin l'année suivante. Il y démontra que le calendrier chrétien comportait une erreur de cinq ans et fut ainsi le premier à revoir la date de naissance de Jésus, en l'an -4.

Entre 1617 et 1621, il écrit *Epitome Astronomiae Copernicae*, une introduction à l'astronomie copernicienne. Il construisit une table de logarithmes, publiée en 1624 dans *Chilias logarithmorum* à Marbourg, en améliorant la méthode de calcul proposée par John Napier.

Bien qu'achevées depuis un moment déjà, il publia à Ulm, en 1627, ses tables rudolphines (*Tabulae Rudolphinae*) en hommage à Rodolphe II. Ces tables de positions planétaires étaient fondées sur les observations de Tycho Brahe et de ses propres travaux sur la mécanique céleste. Ce retard était dû à un différend avec les héritiers de Tycho Brahe qui ne voulaient pas que les travaux de Tycho soient exploités sans percevoir une partie des gains, ainsi qu'à leur demande de modification de l'introduction de l'ouvrage.

Lors de son séjour à Ulm, il est chargé, avec Faulhaber, de définir des unités de mesure pour les activités commerciales et militaires. Il émit la conjecture mathématique appelée « conjecture de Kepler » concernant l'empilement des sphères (ou des boulets de canons). Celle-ci n'a été démontrée par l'Américain Thomas Hales qu'en 2003 et encore pas tout à fait suivant les critères des mathématiciens. Elle énonce que, dans l'espace, l'empilement des sphères le plus dense est celui du marchand des quatre saisons à savoir *le cubique face centrée*.



Planisphère de Kepler réalisé en 1627 dans son ouvrage « Tabulae Rudolphinae »

Kepler et l'astrologie

Kepler était persuadé que l'astrologie pouvait devenir une science au même titre que la physique ou les mathématiques. Il était convaincu que les positions des planètes affectaient les humains et influençaient la météorologie terrestre. Pour lui, astronomie et astrologie étaient liées. C'est ainsi qu'il essaya de poser des bases scientifiques rigoureuses à l'astrologie en faisant intervenir les principes physiques de son époque, essentiellement autour de considérations sur la nature de la lumière. Par exemple différences entre lumière propre (du soleil) et lumière réfléchi (de la lune, mais aussi des planètes), etc. La publication de ses horoscopes et de ses prédictions lui fit une bonne renommée. En 1595, il prédit un soulèvement de la population, une invasion turque ainsi qu'un hiver rigoureux. Il se trouve que de tels événements se produisirent. Il compila plus tard l'horoscope du général Albrecht von Wallenstein qui s'arrêta par un « violent événement » en 1634. Wallenstein fut en effet assassiné le 24 février de cette année. Il laissa trois écrits sur l'astrologie : *De fundamentis astrologiae*, en 1601; le *Tertius interveniens* en 1610 et *Astrologicus*, en 1620. Il attribue d'ailleurs aux astres le malheur et le comportement de ses parents, qu'il croit nés sous une mauvaise étoile, ainsi que son premier mariage, décevant, sous un « ciel calamiteux ».

Il est par ailleurs très critique vis-à-vis de l'astrologie populaire et de ses prédictions, comme de tout temps (aujourd'hui encore) les astrologues « savants » ont critiqué les astrologues « populaires » sans réussir à définir la ligne de démarcation. Le *De fundamentis astrologiae* de 1601 par exemple, est un mini-traité visant à fonder physiquement l'astrologie (contre la tradition, ce pourquoi le *Tertius interveniens* 1610 est une réponse aux objections formulées par quelques astrologues de son temps contre ses considérations « physiques » sur l'astrologie). Kepler préconisa de ne conserver de l'astrologie que les aspects et de ne pas considérer les positions zodiacales. Il ne fut guère suivi dans cette direction si ce n'est en augmentant le nombre des aspects (comme le quintile de 72°). Il y établit quelques prédictions (essentiellement météorologiques) pour l'année 1602 à la suite de la mort, quelques semaines plus tôt, de Tycho Brahe, « Le Phénix des astronomes » (thèse 6). Dans l'introduction de ce texte, Kepler explique qu'il va s'atteler à cette tâche « puisqu'il le faut ». C'est en effet l'une des responsabilités liées à la fonction d'astronome impérial dont il a hérité avec le décès inattendu de Tycho Brahe.

Kepler précurseur de la science-fiction

Kepler est parfois considéré comme un précurseur des romans de science-fiction avec l'écriture de *Somnium, seu opus posthumum de astronomia lunari*. Dans cet ouvrage publié à titre posthume en 1634 par son fils Ludwig, Kepler essaie de diffuser la doctrine copernicienne en détaillant la perception du monde qu'un observateur aurait depuis la Lune. Il explique que « le but de [son] Songe est de donner un argument en faveur du mouvement de la Terre ou, plutôt, d'utiliser l'exemple de la Lune pour mettre fin aux objections formulées par l'humanité dans son ensemble qui refuse de l'admettre ».

D) Christian Huygens (1628-1685)

Christiaan Huygens est un mathématicien, un astronome et un physicien néerlandais.

Huygens est généralement crédité pour son rôle fondamental dans le développement du calcul moderne, en particulier pour avoir développé les techniques de sommation et d'intégration nécessaires à la découverte de l'isochronisme de la cycloïde. En sciences physiques il est célèbre pour la formulation de la théorie ondulatoire de la lumière, et le calcul de la force centrifuge. Il s'est opposé à Leibniz, à la fin de sa vie, dans la mesure où il lui a semblé que le calcul infinitésimal n'était au fond qu'une affaire de langage, la géométrie devant seule intervenir dans la mise en forme mathématique des phénomènes. Le calcul ne serait en quelque sorte que l'automatisation de procédures de démonstrations qu'un géomètre avisé sait produire par d'autres moyens. Le développement du calcul infinitésimal à la fin de sa vie lui montrera tout de même, comme le révèle sa correspondance avec Leibniz et l'Hospital, la puissance de cet outil.

En 1655, Huygens découvrit Titan, la principale lune de Saturne. Il examina également les anneaux de Saturne et établit qu'il s'agissait bien d'un anneau entourant la planète. En 1656, il supposa que ces anneaux sont constitués de roches. La même année, il observa la nébuleuse d'Orion. En utilisant son télescope moderne, il put séparer la nébuleuse en différentes étoiles. La partie interne la plus lumineuse de la nébuleuse s'appelle actuellement la région de Huygens en son honneur. Il découvrit également plusieurs nébuleuses et quelques étoiles doubles.

En 1656 il dépose un brevet pour l'invention de l'horloge à pendule. Il a en effet l'idée de réguler des horloges au moyen d'un pendule, afin de rendre la mesure du temps plus précise. Il découvre la formule de l'isochronisme rigoureux en décembre 1659 : lorsque l'extrémité du pendule parcourt un arc de cycloïde, la période d'oscillation est constante quelle que soit l'amplitude. Contrairement à ce que Galilée avait cru démontrer dans les *Discours et démonstrations mathématiques* de 1638, l'oscillation circulaire du pendule n'est pas parfaitement isochrone si l'on excède une amplitude de 5 degrés par rapport au point le plus bas.



Christian Huygens

En 1659, Huygens découvre la formule donnant la force centrifuge, mais ne publie les théorèmes qu'il a découverts qu'en 1673. En 1666, il commence à concevoir que la force centrifuge due à la rotation de la Terre puisse avoir une influence sur une différence de pesanteur entre les pôles et l'équateur. Il s'intéresse aux résultats donnés par plusieurs expéditions dans les décennies qui suivent visant à détecter une telle différence. Vers 1690, en même temps que Newton, il pense que cette différence de pesanteur est incompatible avec une forme purement sphérique de la Terre et donne une estimation de l'aplatissement de celle-ci. En 1665, Huygens découvre que deux horloges placées à proximité peuvent se synchroniser. Huygens est élu « *fellow* » de la Royal Society en 1663. En 1666, Huygens devient un membre éminent de l'Académie royale des sciences fondée par Colbert à Paris. Participant à la réalisation de l'Observatoire de Paris, achevé en 1672, il y effectue encore d'autres observations astronomiques. Huygens est également connu pour ses arguments selon lesquels la lumière est composée d'ondes. En réponse aux articles d'Isaac Newton sur la lumière, en 1672, il se lance dans l'étude de la nature de la lumière, à la suite de savants tels que Rasmus Bartholin. Il découvre en 1677, grâce aux propriétés des cristaux et de leur coupe géométrique, en particulier grâce au spath d'Islande, que les lois de réflexion et de réfraction de Snell-Descartes sont conservées si l'on suppose une propagation de la lumière sous la forme d'ondes. En outre, la double réfraction du spath d'Islande peut être expliquée, ce qui n'est pas le cas avec une théorie corpusculaire. En 1673, Huygens et son jeune assistant Denis Papin, mettent en évidence le principe des moteurs à combustion interne, qui conduiront au XIX^e siècle à l'invention de l'automobile. Ils réussissent à déplacer un piston entraînant une charge de 70 kg sur 30 cm, en chauffant un cylindre métallique vidé d'air, rempli de poudre à canon. Huygens est donc considéré comme le précurseur du moteur à combustion interne.

Huygens retourna à La Haye en 1681 après une sérieuse maladie. Le décès de son protecteur Colbert en 1683 ne lui permet plus d'échapper à la révocation de l'Édit de Nantes aux courants de contre-Réforme qui agitent la France. Il est aussi conduit à méditer sur les relations entre la science et la croyance en général. C'est à ce moment qu'il s'interroge sur la manière de conforter l'hypothèse copernicienne. Dans son livre *Cosmotheoros, sive de terris coelestibus, earumque ornatu, conjecturae* (La Haye, 1698) il illustre en deux parties les conséquences de la thèse copernicienne. Il se situe en cela dans la tradition ouverte par Pierre Borel, Cyrano de Bergerac, Galilée ou Gassendi. D'une part, il se livre à des conjectures relatives à la possibilité d'autres formes de vie dans un univers où chaque soleil est un autre monde. Cette réflexion le conduit à justifier l'existence de planétoles au titre d'une conséquence de la grâce divine qui doit nécessairement s'étendre à l'ensemble de l'univers et ne pas se limiter à notre Terre. Créationniste, Huygens récuse toute possibilité d'évolution ou de transformation des espèces et il ne peut concevoir de vie intelligente que sous une forme nettement anthropoïde. D'autre part, Huygens examine ce que pourraient être les « apparences » telles qu'elles seraient perçues par un observateur situé sur un autre centre de référence que le nôtre. C'était le climat libéral aux Pays-Bas qui a permis, en ce temps de progrès scientifiques, de telles spéculations. Il meurt le 8 juillet 1695. Le module faisant partie de la sonde Cassini et qui a atterri sur Titan a été baptisé du nom de Huygens. L'astéroïde (2801) Huygens a également été nommé en son honneur.

E) Jean-Dominique Cassini (1625-1712)

Giovanni Domenico Cassini, connu en France sous le nom **Jean-Dominique Cassini** (8 juin 1625, Perinaldo, Italie, alors dans le Comté de Nice appartenant au Duché de Savoie – 14 septembre 1712, Paris, France), est un astronome et ingénieur, naturalisé français en 1673. On l'a appelé **Cassini 1^{er}** car il eut un fils, un petit-fils et un arrière petit-neveu astronomes comme lui.

De 1648 à 1669, il travaille à l'observatoire de Panzano (aujourd'hui partie de Castelfranco Emilia) et enseigne la géométrie euclidienne et l'astronomie de Ptolémée (selon la doctrine de l'Église catholique) à l'université de Bologne, où il remplace en 1650 Bonaventura Cavalieri. Il obtient bientôt une telle réputation que le sénat de Bologne et le pape le chargent de plusieurs missions scientifiques et politiques.

Attiré en France par Colbert en 1669, il s'y fait naturaliser et il est reçu membre de l'Académie des sciences fondée deux ans plus tôt. Il dirige, à la demande de Louis XIV, l'observatoire de Paris à partir de 1671.



Jean-Dominique Cassini

Il participe à la découverte de la variation d'intensité de la pesanteur en fonction de la latitude au cours d'un voyage à Cayenne. Il découvre la grande tache rouge de Jupiter en 1665, et détermine la même année la vitesse de rotation de Jupiter, Mars et Vénus. Il découvre également quatre satellites de Saturne (Japet en 1671, Rhéa en 1672, Téthys et Dioné en 1684), ainsi que la division des anneaux de Saturne en 1675 (qui s'appellera la division Cassini en son honneur). En 1673, il fait la première mesure précise de la distance de la Terre au Soleil, grâce à la mesure de la parallaxe de Mars déduite des observations de Jean Richer à Cayenne. En 1683, il détermine la parallaxe du Soleil. Vers 1690, il est le premier à observer la rotation différentielle dans l'atmosphère de Jupiter. Devenu aveugle en 1710, il meurt deux ans plus tard à Paris, le 14 septembre 1712. Il publie de 1668 à 1693 les *Éphémérides des satellites de Jupiter* et rédige un grand nombre de mémoires, dont une partie a été réunie sous le titre d'*Opera astronomico* en 1728.

Hommages

En 1790, la rue Cassini, près de l'observatoire de Paris, prend son nom.

L'astéroïde (24101) Cassini, le cratère martien Cassini, le cratère lunaire Cassini et la sonde Cassini-Huygens ont été nommés en son honneur. L'astéroïde (24102) Jacques Cassini a été nommé en l'honneur de son fils, Jacques Cassini, né en 1677.

F) Isaac Newton (1643-1727)

Né le 25 décembre 1642 selon le calendrier Julien, mais le 4 janvier 1643 si l'Angleterre avait suivi alors notre calendrier actuel. **Isaac Newton** est un philosophe, mathématicien, physicien, alchimiste, astronome et théologien anglais, puis britannique. Figure emblématique des sciences, il est surtout reconnu pour avoir fondé la mécanique classique, pour sa théorie de la gravitation universelle et la création, en concurrence avec Gottfried Wilhelm Leibniz, du calcul infinitésimal. En optique, il a développé une théorie de la couleur

basée sur l'observation selon laquelle un prisme décompose la lumière blanche en un spectre visible. Il a aussi inventé le télescope à réflexion composé d'un miroir primaire concave appelé télescope de Newton.

En mécanique, il a établi les trois lois universelles du mouvement qui constituent en fait des principes à la base de la grande théorie de Newton concernant le mouvement des corps, théorie que l'on nomme aujourd'hui « mécanique newtonienne » ou encore « mécanique classique ». Il est aussi connu pour la généralisation du théorème du binôme et l'invention dite de la méthode de Newton permettant de trouver des approximations d'un zéro (ou racine) d'une fonction d'une variable réelle à valeurs réelles. Newton a montré que le mouvement des objets sur Terre et des corps célestes sont gouvernés par les mêmes lois naturelles; en se basant sur les lois de Kepler sur le mouvement des planètes, il développa la loi universelle de la gravitation. Son ouvrage *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, écrit en 1686, est considéré comme une œuvre majeure dans l'histoire de la science. C'est dans celui-ci qu'il décrit la loi universelle de la gravitation, formule les trois lois universelles du mouvement et jette les bases de la mécanique classique. Il a aussi effectué des recherches dans les domaines de la théologie et l'alchimie.

Isaac Newton était si chétif qu'on aurait juré qu'il trépasserait dans la journée. En fait, c'est son père, un petit fermier, qui va décéder quelques mois plus tard. Sa mère, presque illettrée, se laisse consoler en 1645. Elle convole en deuxième noces avec un pasteur qui ne veut pas entendre parler de l'enfant, qu'elle abandonne donc à sa famille. Pour certains auteurs, ceci explique pourquoi Newton ne s'est jamais marié. De nature délicate, Isaac préfère jouer avec les filles. Son oncle ne tarde pas à comprendre qu'il n'est pas fait pour le travail des champs et l'envoie donc à l'école. Doué à la fois d'habileté manuelle et d'une superbe intelligence, Isaac entretient avec les autres élèves des relations difficiles. Ceci sera une caractéristique de la vie de Newton. En 1661, il entre au Trinity College de Cambridge en qualité de « sizar », c'est-à-dire d'étudiant pauvre chargé des basses besognes comme vider les pots de chambre et porter le bois de chauffage en échange de la gratuité des études. Cette situation, particulièrement humiliante pour un jeune dont la mère est devenue riche à la suite d'un deuxième veuvage, ne changera qu'en 1667 lorsqu'il deviendra « fellow » : il sera alors logé et percevra un salaire. Entre-temps, Newton avait dû se réfugier chez sa mère en 1665 pendant 18 mois pour fuir la peste qui sévissait à Londres.

L'étudiant et le chercheur

À dix-huit ans, il entre alors au Trinity College de Cambridge (il y restera sept ans), où il se fait remarquer par son maître de mathématiques, Isaac Barrow. Il a également comme professeur Henry More qui l'influencera dans sa conception de l'espace absolu. À Cambridge, il étudie l'arithmétique, la géométrie dans les *Éléments* d'Euclide et la trigonométrie, mais s'intéresse particulièrement à l'astronomie, à l'alchimie et à la théologie. Il devient à vingt-cinq ans bachelier des arts, mais est contraint de suspendre ses études pendant deux années à la suite de l'apparition de la peste qui s'est abattue sur la ville en 1665; il retourne dans sa région natale. C'est à cette période que Newton progresse fortement en mathématiques, physique et surtout en optique (il montre avec un prisme que la lumière n'est pas blanche mais qu'elle est constituée d'un spectre coloré); toutes les grandes découvertes qu'il explicitera dans les années suivantes découlent de ces deux années.

L'épisode de la pomme

C'est également à cette époque qu'aurait eu lieu l'épisode (vraisemblablement légendaire) de la pomme qui tomba de l'arbre sur sa tête, lui révélant les lois de la gravitation universelle. Voici un témoignage venu bien plus tard, en 1752, de son ami William Stukeley citant une rencontre d'avril 1726 avec Newton : « Après souper, le temps clémente nous incita à prendre le thé au jardin, à l'ombre de quelques pommiers. Entre autres sujets de conversation, il me dit qu'il se trouvait dans une situation analogue lorsque lui était venue l'idée de la gravitation. Celle-ci avait été suggérée par la chute d'une pomme un jour que, d'une humeur contemplative, il était assis dans son jardin ».

Newton accélère dans ses recherches, il entame en 1666 l'étude des fonctions dérivables et de leurs dérivées à partir du tracé des tangentes sur la base des travaux de Fermat. Il classe les cubiques et en donne des tracés corrects avec asymptotes, inflexions et points de rebroussement. En 1669, il rédige un compte rendu sur les fondements du calcul infinitésimal qu'il appelle « méthode des fluxions ». Newton a fondé ainsi l'analyse mathématique moderne. En 1669 toujours, Newton succède à son maître Barrow qui s'était démis pour se consacrer exclusivement à la théologie et reprend sa chaire de professeur lucasien de

mathématiques. Trois ans plus tard, à l'âge de 29 ans, il entre à la Royal Society de Londres, où il fera la rencontre de Robert Boyle, homme très influent. Il réussit l'exploit de mettre au point un télescope à miroir sphérique dépourvu d'aberration chromatique. L'année d'après, il prit la décision de communiquer grandement sur ses travaux sur la lumière, ce qui le rendit célèbre d'un seul coup. Cette célébrité fit de ses découvertes l'objet de nombreuses controverses et querelles dont il avait horreur. En 1675, dans son ouvrage *Opticks* (publié en 1704) il expose ses travaux sur la lumière et prouve qu'elle est constituée d'un spectre de plusieurs couleurs, à l'aide de son prisme. Il complète ses travaux en exposant sa théorie corpusculaire. Après avoir terminé ses travaux en optique, il est contacté en 1684 par l'astronome britannique Edmond Halley (le découvreur de la célèbre comète homonyme) à propos des lois de Kepler sur les orbites elliptiques des planètes. Newton répond de manière convaincante et Halley le pousse à publier ses travaux, en finançant même la publication de son ouvrage.

En 1687, il publie donc son œuvre majeure : *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, (*Principes mathématiques de la philosophie naturelle*). Cette œuvre marque le début de la mathématisation de la physique. En effet, Newton y expose le principe d'inertie, la proportionnalité des forces et des accélérations, l'égalité de l'action et de la réaction, les lois du choc, il y étudie le mouvement des fluides, les marées, etc. Mais il expose aussi et surtout sa théorie de l'attraction universelle ! Les corps s'attirent avec une force proportionnelle au produit de leur masse et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. La simplicité et l'efficacité de cette théorie auront une très forte influence sur les autres sciences au XVIII^e siècle, particulièrement les sciences sociales comme nous le verrons. Toutefois, sur le moment, si le livre est bien accueilli en Grande-Bretagne, sur le continent la réaction est hostile. En 1687, il défend les droits de l'université de Cambridge contre le roi Jacques II. Cette action lui vaut d'être élu membre du parlement britannique en 1689 quand le roi, vaincu, doit s'exiler. Durant son mandat il est très actif dans les débats.

Une personnalité complexe

Newton était doté d'une personnalité tourmentée et complexe. Il répugne à communiquer ses travaux et les publie souvent plusieurs années après les avoir achevés. Newton a tendance à se replier sur lui-même, il vit seul et est un bourreau de travail. En effet, il en oublie parfois de dormir ou de manger. De surcroît, ses relations avec les autres sont souvent assez problématiques. Il s'oppose souvent avec Robert Hooke à propos de la lumière et de sa théorie sur la gravitation. Newton attendra que Hooke meure pour publier ses travaux sur l'optique. Hooke accusa Newton de l'avoir plagié sur la théorie des inverses carrés, car ce dernier avait commencé ses travaux en parallèle de Hooke et sans rien dire à personne, ce qui rendit Hooke furieux. Newton prétendit alors n'avoir pas eu connaissance des recherches de Hooke et n'avoir pas lu ses travaux sur la gravitation. On sait aujourd'hui que Newton a menti, non pas par culpabilité, mais par son horreur du personnage. En 1692-1693, il subit une grave période de dépression nerveuse, probablement due à la mort de sa mère, l'explosion de son laboratoire d'alchimie, et/ou à l'excès de travail... Il subit de grands troubles émotifs et vit alors dans un état de prostration, vivant dans un état de paranoïa et sujet à des hallucinations. Il met trois ans à s'en remettre.

Newton à Londres

En avril 1696, il démissionne du Collège de Cambridge et en quitte la ville pour devenir d'abord gardien de la Royal Mint puis maître de la monnaie dès l'année suivante. Ce poste honorifique est obtenu grâce à l'appui de Charles Montagu un ancien de Cambridge alors Chancelier de l'Échiquier. Il s'impliqua beaucoup dans cette fonction. Newton estimait que 20 % des pièces de monnaie mises en circulation pendant la Grande Réforme monétaire de 1696 étaient contrefaites. La contrefaçon était considérée comme un acte de trahison, passible de mort par écartèlement, à condition que les preuves soient irréfutables. Newton rassembla donc des faits et démontra ses théories de manière rigoureuse. Entre juin 1698 et Noël 1699, il conduisit environ 200 contre-interrogatoires de témoins, d'informateurs et de suspects et il obtint les aveux dont il avait besoin. Il n'avait pas le droit de recourir à la torture, mais on s'interroge sur les moyens employés puisque Newton lui-même ordonna par la suite la destruction de tous les rapports d'interrogation. Quoi qu'il en soit il réussit et emporta la conviction du jury : en février 1699, dix prisonniers attendaient leur exécution. Newton obtint son plus grand succès comme attorney royal contre William Chaloner. Celui-ci était un escroc particulièrement retors qui s'était suffisamment enrichi pour se poser en riche bourgeois. Dans une pétition au Parlement, Chaloner accusa l'Hôtel des Monnaies de fournir des outils aux

contrefacteurs, accusation qui n'était pas nouvelle, et il proposa qu'on lui permît d'inspecter les procédés de l'Hôtel des Monnaies pour les améliorer. Dans une pétition, il présenta au Parlement ses plans pour une invention qui empêcherait toute contrefaçon. Pendant tout ce temps, Chaloner profitait de l'occasion pour frapper lui-même de la fausse monnaie, ce que Newton arriva au bout du compte à démontrer devant le tribunal compétent. Le 23 mars 1699, Chaloner fut pendu et écartelé. En 1699, il est nommé Directeur de la Monnaie par Montagu. Cette même année, il est nommé membre du conseil de la Royal Society et y est élu président en novembre 1703. Il garde cette place jusqu'à sa mort. Auparavant, en 1701, il lit lors d'une réunion le seul mémoire de chimie qu'il a fait connaître et présente sa loi sur le refroidissement par conduction, ainsi que des observations sur les températures d'ébullition et de fusion. Il décide alors de quitter sa chaire lucasienne à l'université de Cambridge.

En 1704 il fait publier, en anglais, ses travaux concernant la lumière qu'il tenait cachés depuis vingt ans (il fera publier une version en latin d'*Optiks* deux ans plus tard). En 1705, il est anobli par la reine Anne peut-être moins en raison de ses travaux scientifiques ou de son rôle à la Monnaie que de la proximité d'élections. En 1717, il analyse les pièces de monnaie et en tire une relation or-argent; cette relation est officialisée par une loi de la reine Anne.

Isaac Newton tombe malade en 1724. En 1725 le jésuite Étienne Souciet publie de sa propre initiative une version abrégée, en français, de *The chronology of ancient kingdoms amended* un texte que le roi Georges I^{er} avait demandé à Newton pour répondre à un écrit de Leibniz de 1715. En 1727 Newton se remet à peine d'une crise de goutte qu'il se rend à Londres pour présider une réunion de la Royal Society. Ce voyage le fatigue terriblement... De retour dans sa propriété campagnarde de Kensington, il doit rester alité et meurt le 31 mars 1727, à l'âge de 84 ans. Son corps est alors porté en grande pompe et inhumé dans la nef de l'abbaye de Westminster, aux côtés des rois d'Angleterre.

Théories scientifiques

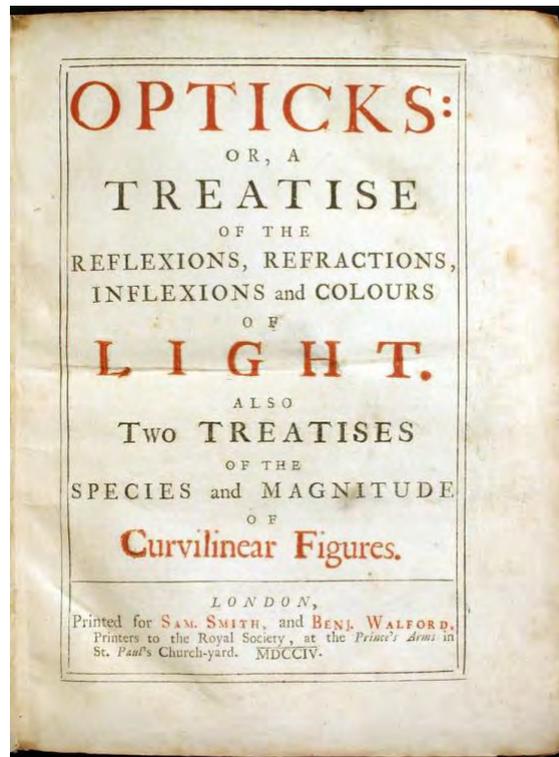
Quant à la méthode, Newton n'accepte que les relations mathématiques découvertes par l'observation rigoureuse des phénomènes. D'où sa fameuse formule : « Je ne feins pas d'hypothèses (*Hypotheses non fingo*) ».

Il précise : « Tout ce qui n'est pas déduit des phénomènes, il faut l'appeler hypothèse; et les hypothèses, qu'elles soient métaphysiques ou physiques, qu'elles concernent les qualités occultes ou qu'elles soient mécaniques, n'ont pas leur place dans la philosophie expérimentale ».

Optique

Au cours de 1670 à 1672, Newton étudie la réfraction de la lumière, il démontre qu'un prisme décompose la lumière blanche en un spectre de couleurs, et qu'un objectif avec un deuxième prisme recompose le spectre multicolore en lumière blanche.

C'est en 1666 qu'Isaac Newton fit ses premières expériences sur la lumière et sa décomposition. Il fit passer des rayons de Soleil à travers un prisme produisant un arc-en-ciel de couleurs du spectre visible. Auparavant, ce phénomène était considéré comme si le verre du prisme avait de la couleur cachée. Newton analysa alors cette expérience. Comme il avait déjà réussi à reproduire le blanc avec un mini arc-en-ciel qu'il passa à travers un deuxième prisme, sa conclusion était révolutionnaire : la couleur est dans la lumière et non dans le verre. Ainsi, la lumière blanche que l'on voit est en réalité un mélange de toutes les couleurs du spectre visible par l'œil. Il a également montré que la lumière colorée ne modifie pas ses propriétés par la séparation en faisceaux de couleurs qui font briller des objets. Newton a noté que, indépendamment de savoir si les faisceaux de lumière sont reflétés, dispersés ou transmis, ils restent toujours de même couleur (longueur d'onde). Ainsi, il fit observer que celle-ci est le résultat de l'interaction avec les objets et que la lumière contient en elle-même la couleur. C'est ce qu'on appelle la théorie de la couleur de Newton.



Première édition datant de 1704 du traité Opticks sur la réflexion, la réfraction, la diffraction et la théorie des couleurs.

En 1704, il fit publier son traité *Opticks* dans lequel est exposé sa théorie corpusculaire de la lumière, l'étude de la réfraction, la diffraction de la lumière et sa théorie des couleurs. Dans celui-ci, il démontre que la lumière blanche est formée de plusieurs couleurs et déclare qu'elle est composée de particules ou de corpuscules. De plus, il ajoute que lorsque celle-ci passe par un milieu plus dense, elle est réfractée par son accélération. À un autre endroit de son traité, il explique la diffraction de la lumière en l'associant à une onde.



Réplique du télescope de 6 pouces (150 mm) qu'Isaac Newton présenta à la Royal Society en 1672

Dans le domaine des instruments d'optique de son époque, il n'invente pas, mais améliore en 1671 le télescope à réflexion de Gregory. Par son travail sur la réfraction, montrant la dispersion des couleurs, il

conclut que tout télescope à réfraction ou lunette astronomique présente une dispersion de la lumière, ou aberration chromatique, qu'il pense impossible de corriger; Il contourna le problème en proposant un télescope à réflexion par miroir concave (car naturellement dépourvu d'aberration chromatique), connu sous le nom de télescope de Newton. On sait depuis Chester Moore Hall et surtout John Dollond que l'aberration chromatique peut être compensée en utilisant plusieurs lentilles d'indices et de dispersion différents. Fabriquant ses propres miroirs à partir d'un bronze à haut pouvoir réfléchissant, il juge la qualité de l'image optique au moyen du phénomène appelé aujourd'hui anneaux de Newton. Ainsi, il a été en mesure de produire un instrument supérieur à la lunette astronomique de Galilée, en raison aussi d'un plus large diamètre permis sans altération de l'image. Il construisit alors la première version de son télescope à réflexion, composé d'un miroir primaire concave. Dans la même année, la Royal Society l'invite à faire une démonstration de son télescope à réflexion. Cet intérêt motive Newton à publier ses notes sur sa théorie des couleurs, qu'il a par la suite développée dans son traité d'optique. Il présenta son télescope en 1672.

Toujours dans son traité *Opticks* de 1704, Newton expose sa théorie de la lumière. Il la considère composée de corpuscules très subtils. La matière ordinaire est constituée de plus gros corpuscules. Il a également construit une forme primitive de générateur électrostatique par frottement, au moyen d'un globe en verre. Newton a déclaré que la lumière est composée de particules ou de corpuscules. Que lorsqu'elle passe par un milieu plus dense, elle est réfractée par l'accélération. Il expliqua la diffraction de la lumière en associant ces particules à des ondes.

Newton a eu ses contradicteurs. Lorsque Robert Hooke s'aperçut que les travaux de Newton en optique coïncidaient avec les siens, il commença à critiquer avec virulence certaines idées de Newton. Fatigué des objections dont il faisait l'objet, Newton s'est alors retiré de tout débat public. Les deux hommes sont demeurés ennemis le restant de leur vie. En France, Jacques Gautier d'Agoty dans *Chroa-génésie ou génération des couleurs* paru en 1751 critique la théorie newtonienne de la génération des couleurs et de la raison de l'arc-en-ciel. Jean-Jacques Rousseau soutiendra la théorie de Newton.

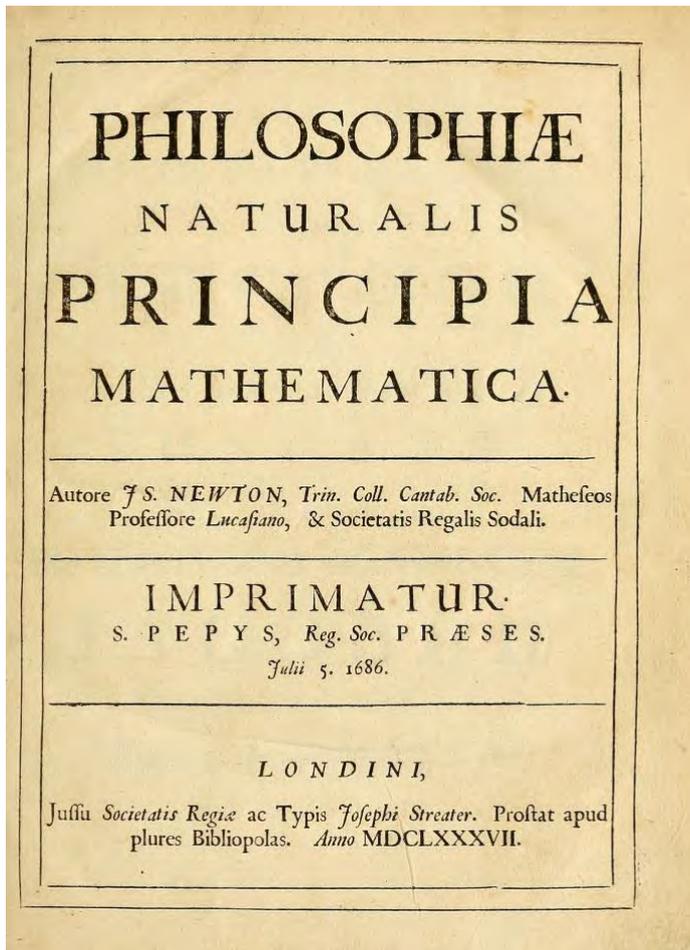
Mécanique

En 1677, Newton reprit ses travaux sur la mécanique. C'est-à-dire la gravitation et ses effets sur les orbites des planètes, selon les références des lois de Kepler du mouvement des planètes; et aussi en consultant Robert Hooke et John Flamsteed à ce sujet. En novembre 1684, il fit parvenir à Halley un petit traité de neuf pages avec le titre : *De motu corporum in gyrum (en)* (Mouvement des corps en rotation), montrant la loi en carré inverse, la force centripète, il contient les prémices des lois du mouvement de Newton que nous retrouvons dans son œuvre majeure *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (aujourd'hui connue sous le nom de *Principia* ou *Principia Mathematica*) qui a été publiée le 5 juillet 1687 grâce à l'aide financière et l'encouragement venant d'Edmond Halley.

Les méthodes de calcul qu'il y utilise en font un précurseur du calcul vectoriel. Dans son travail Newton établit les trois lois universelles du mouvement qui sont restées inchangées, ceci sans aucune amélioration durant plus de deux siècles. Il se servait du mot poids, en latin *gravitas*, pour parler des effets de ce que nous appelons maintenant la gravité et il définit les lois de la gravitation universelle. Dans le même ouvrage il présenta la première analyse des déterminations basée sur la vitesse du son dans l'air des lois d'Edmond Halley et de Robert Boyle.

Avec les *Principia*, Newton est reconnu internationalement. Il se forma un cercle d'admirateurs, y compris le mathématicien Nicolas Fatio de Duillier d'origine suisse, avec qui il a bâti une relation intense qui a duré jusqu'en 1693.

Son ouvrage majeur, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, fut publié en 1687. La version française en deux volumes avec une traduction Tome I et Tome II de la marquise du Châtelet fut éditée en 1756. Les travaux de Newton furent populaires en France, grâce à la diffusion de ses idées par le célèbre philosophe des Lumières, Voltaire. Cependant, plusieurs querelles s'installèrent, entre newtoniens et cartésiens. Cette œuvre marque un tournant pour la physique. Il y avance le principe d'inertie, la proportionnalité des forces et des accélérations, l'égalité de l'action et de la réaction, les lois des collisions, il montre le mouvement des fluides et surtout la théorie de l'attraction universelle.



Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica

Isaac Newton est avant tout le père de la mécanique moderne grâce aux trois lois du mouvement qui portent son nom et dont on donne ci-après les énoncés tels qu'ils sont enseignés de nos jours :

- Principe d'inertie
- Principe fondamental de la dynamique
- Principe des actions réciproques

On appelle parfois cette dernière loi la *loi d'action réaction* mais ce vocabulaire est susceptible de prêter à confusion (voir principe des actions réciproques). Dans le langage courant, la Mécanique est le domaine de tout ce qui produit ou transmet un mouvement, une force, une déformation : machines, moteurs, véhicules, organes (engrenages, poulies, courroies, vilebrequins, arbres de transmission, pistons, etc.). On parle ainsi de mécanique générale, de génie mécanique, de mécanique automobile, de sports mécaniques, de mécanique navale, de mécanique céleste, de mécanique quantique, de résistance mécanique des matériaux, etc. Aujourd'hui ses trois lois du mouvement, mises à mal par le développement de la thermodynamique au XIX^e siècle, sont dépassées par la mécanique relativiste d'Einstein et le principe de la dualité onde-corpuscule. Cependant le génie de la mécanique de Newton était de simplifier beaucoup, ce qui contribua au développement des recherches dans le domaine de la mécanique classique, où la masse s'identifie à la matière et où l'on suppose une continuité parfaite.

Mathématiques

En plus de ses contributions à la physique, Newton, parallèlement à Gottfried Wilhelm Leibniz, élaborait les principes fondateurs du calcul infinitésimal. Alors que Newton ne fit rien éditer sur sa méthode des infiniment petits ou des fluxions et les suites infinies avant 1687, Leibniz publia ses travaux en 1684. Si le problème de priorité de l'invention s'est posé, Newton dans son œuvre des *Principia* publiée en 1687 rend hommage à la découverte de Leibniz en reconnaissant qu'il était parvenu aux mêmes résultats que lui par une méthode analogue à la sienne. Malgré cela des membres de la Royal Society (dont Newton était membre) ont accusé Leibniz de plagiat finissant par créer un différend en 1711. C'est ainsi que la Royal Society proclama dans une étude que Newton était le vrai découvreur de la méthode et Leibniz un imposteur. Ceci a entaché aussi bien la vie de Newton que celle de Leibniz jusqu'à sa mort survenue en 1716.

Newton a entretenu une relation très étroite avec le géomètre Nicolas Fatio de Duillier qui a été impressionné par sa théorie de la gravitation. En 1691, celui-ci prépara une nouvelle version de l'ouvrage *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* mais il ne l'acheva pas. Toutefois, en 1694 la relation entre les deux hommes se refroidit. À partir de ce moment, Duillier provoqua une querelle sur la paternité de la découverte du calcul infinitésimal et entretint une correspondance avec Leibniz. Cependant dans un mémoire publié en 1699, Duriez désigna Newton comme le premier inventeur de la méthode des infiniment petits. Newton est également connu pour sa formule du binôme. Il a découvert aussi les identités de Newton, la méthode de Newton et les courbes cubiques planes (polynômes de degré trois à deux variables). Il est le premier à avoir utilisé des indices fractionnaires en géométrie analytique pour résoudre les équations diophantiennes. Il a aussi estimé les sommes partielles de séries harmoniques en utilisant des logarithmes (un résultat précurseur d'une célèbre formule d'Euler) et trouvé une formule pour calculer le nombre pi (π). Il a été élu professeur lucasien de mathématiques de l'université de Cambridge en 1669.

La loi universelle de la gravitation

Outre la mise au point du fonctionnement du premier télescope à réflexion composé d'un miroir primaire concave, Newton découvrit la loi universelle de la gravitation ou de l'attraction universelle en tant que cause des mouvements des planètes. En 1684, Newton informa par une lettre adressée à son ami Edmond Halley qu'il a résolu le problème de la force inversement proportionnelle au carré des distances et celui des orbites elliptiques introduit par Kepler. En 1685, il rédigea son opuscule *De motu corporum in gyrum* (sur le mouvement) dans lequel il décrit sa loi, unifiant ainsi la mécanique terrestre et la mécanique céleste. Il exprime cette loi de manière simplifiée par l'expression mathématique suivante :

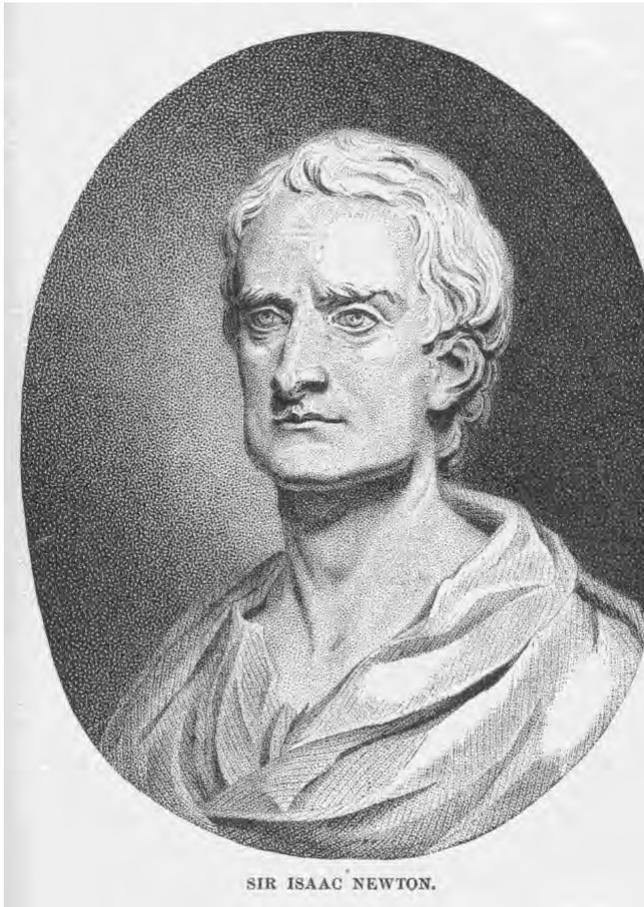
$$\vec{F} = -G \frac{M_A M_B}{AB^2} \vec{u}$$

où \vec{u} est le vecteur unitaire indiquant la direction du mouvement, \vec{F} la force et G une constante de proportionnalité ou la constante gravitationnelle. Par sa formule résultante des trois lois de Kepler, il expliqua et démontra les mouvements des planètes autour de leur orbite. Cependant, la gravitation n'est pas seulement une force exercée par le Soleil sur les planètes, selon la loi de la gravitation de Newton, tous les objets du cosmos s'attirent mutuellement. Ainsi, Newton s'est rendu compte que les mouvements des corps célestes ne pouvaient être constants ouvrant ainsi la voie à la mécanique relativiste et à l'élaboration du principe de relativité par Albert Einstein. Newton a déclaré que les planètes ne repassent pas deux fois dans la même orbite. La mécanique céleste qui repose sur les trois lois de Kepler et la loi universelle de la gravitation de Newton suffit, encore aujourd'hui, à expliquer par le calcul les mouvements des astres dans un univers local, tel que le système solaire.

Newton hors du cadre des sciences naturelles *stricto sensu* - Newton et la religion

Newton fut profondément religieux toute sa vie. Fils de puritains, il a passé plus de temps à l'étude de la Bible que de la science. Une étude de tout ce qu'il a écrit révèle que, sur les 3 600 000 mots qu'il a écrits, seuls 1 000 000 concernent la science et 1 400 000 la théologie. Il a notamment produit des écrits sur la Bible et les Pères de l'Église, dont *An Historical Account of Two Notable Corruptions of Scripture*, une critique textuelle des Saintes Écritures qui a été remarquée. À Cambridge, John Locke, à qui il avait parlé de ses écrits théologiques, l'engagea à persévérer. Il croyait en un monde immanent. Il voit une évidence du dessein divin dans le système solaire : « L'admirable uniformité du système planétaire force à y reconnaître les effets d'un choix ». Il insistait cependant sur le fait qu'une intervention divine serait requise pour « réparer » le système en raison de la lente croissance de son instabilité. Isaac Newton appartenait à la franc-maçonnerie. Il était un ami de Jean Théophile Désaguliers et de James Anderson, qui ont fondé la Grande Loge de Londres en 1717, marquant le passage de la maçonnerie opérative à la maçonnerie spéculative moderne. Newton va adopter ce qu'on pourrait nommer « un positivisme méthodologique, en vertu duquel est reconnue l'autonomie du discours scientifique, sans que cette attitude en matière d'épistémologie implique le renoncement à tout arrière-plan métaphysique et théologique ». C'est ainsi que, bien que la loi universelle de la gravitation soit sa découverte la plus connue, Newton met en garde ceux qui verraient l'Univers comme une simple machine. Il affirme : « La gravité explique le mouvement des planètes, mais elle ne peut expliquer ce qui les mit en mouvement. Dieu gouverne toutes choses et sait tout ce qui est ou tout ce qui peut être ».

Newton et Leibniz



Isaac Newton



Gottfried Wilhelm von Leibniz

La controverse qui a opposé ces deux grands esprits au tout début du XVIII^e siècle, a porté principalement sur deux points. L'un assez secondaire concernait leur commune revendication de la découverte du calcul infinitésimal, l'autre point beaucoup plus important avait trait aux raisons profondes de leur opposition sur la théorie de la gravitation. Si, pour Gottfried Wilhelm von Leibniz, le mouvement des planètes autour du Soleil est dû à la circulation harmonique d'un éther fluide autour du Soleil qui emporterait les étoiles, c'est à cause de sa conception du monde. En effet, sa métaphysique lui interdit de concevoir un espace vide, car ce serait « attribuer à Dieu une production très imparfaite ». Les cartésiens sur ce point étaient proches de Leibniz de sorte que Roger Cotes durant la controverse désignera cartésiens et leibniziens sous le terme de « plénistes ». Bien qu'étant un des premiers partisans de René Descartes en Angleterre, Henry More un philosophe de l'école dite des Platoniciens de Cambridge sera un des premiers à s'opposer à cette conception en affirmant « l'existence effective de l'espace vide infini ». D'une certaine manière il ouvre une voie que suivra en partie Newton ultérieurement.

La controverse sera menée avec l'aval de Newton par certains de ses proches tels que Samuel Clarke et Roger Cotes. Elle visait Leibniz et les cartésiens mais ces derniers n'y répondirent pas. Elle a porté sur la conception de Dieu et de façon adjacente sur la notion de liberté et de rationalité. Le sens de cette controverse est important à saisir car pour Alexandre Koyré la victoire de Newton fut une victoire à la Pyrrhus remportée à un prix désastreux « C'est ainsi que la force d'attraction qui, pour Newton, était la preuve de l'insuffisance du mécanisme pur et simple, une démonstration de l'existence des forces supérieures, non mécaniques, la manifestation de la présence et de l'action de Dieu dans le monde cessa de jouer ce rôle pour devenir une force purement naturelle, propriété de la matière qui ne faisait qu'enrichir le mécanisme au lieu de le supplanter ».

Concernant la conception de Dieu pour Alexandre Koyré « l'opposition fondamentale est cependant parfaitement claire : le Dieu de Leibniz n'est pas le Seigneur newtonien, qui fait le monde comme il l'entend et continue à agir sur lui comme le Dieu de la Bible l'avait fait pendant les six premiers jours de la Création. Il est, si j'ose poursuivre la comparaison, le Dieu biblique au jour du Sabbat, le Dieu qui a achevé son œuvre

et trouve qu'elle représente ...le meilleur des mondes possibles... ». À l'inverse de Leibniz, pour Newton le Monde est réformable et s'il a découvert les lois de l'attraction universelle il n'a trouvé aucune nécessité à ce que ces lois fussent telles qu'elles sont. Il a simplement constaté leur existence. Cette recherche de lois nécessaires par les leibniziens nie pour Samuel Clarke la liberté des agents. Aussi dans sa quatrième réponse à Leibniz, il écrira : « La Doctrine que l'on trouve ici, conduit à la Nécessité & à la Fatalité, en supposant que les Motifs ont le même rapport à la volonté d'un Agent intelligent que les Poids à une balance... Mais les Êtres intelligents sont des Agents; ils ne sont point simplement passifs & les Motifs n'agissent pas sur eux, comme les Poids agissent sur une Balance. Ils ont des forces actives... ». Chez Leibniz et chez certains cartésiens français comme Nicolas Malebranche, il y a l'idée que par sa raison l'homme « peut trouver avec évidence ce que Dieu pouvait faire de mieux ». Au contraire chez Newton et les newtoniens, la raison tend à chercher à observer les faits, à les expliquer mais il y a une certaine volonté à ne pas se laisser entraîner vers des explications totales. Newton écrit dans les *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* « J'ai expliqué jusqu'ici les phénomènes célestes & ceux de la mer par la force de la gravitation, mais je n'ai assigné nulle part la cause de cette gravitation ».

Influence de Newton sur les autres sciences au XVIII^e siècle

Pour Georges Gusdorf, « l'imitation de Newton devient l'ambition secrète de tous les savants, quelle que soit leur science. Le système de Newton de l'intelligibilité est admis comme le prototype de toute connaissance parvenue à un état d'achèvement définitif ». Pour Dellemotte, chez Adam Smith, dans la *Théorie des sentiments moraux*, la sympathie occupe dans le domaine moral la même fonction que le principe de gravitation. Rappelons qu'Adam Smith, est un admirateur de Newton et qu'il a rédigé une *Histoire de l'astronomie* d'une grande importance pour comprendre le cadre de sa pensée. D'Alembert dans le Discours préliminaire à l'Encyclopédie loue Newton, d'avoir appris à la philosophie (à l'époque, ce mot désigne aussi la science) « à être sage, et à contenir dans de justes bornes cette espèce d'audace que les circonstances avaient forcé Descartes à lui donner ». Cette approche marque l'Encyclopédie qui doit accepter que la connaissance soit lacunaire et que l'esprit ne puisse pas tout ordonner, mesurer et ranger. Si D'Alembert a entendu parler des travaux métaphysiques de Newton, il les tient pour peu importants ; pour lui, le Newton de la métaphysique est John Locke dont il dit « on peut dire qu'il créa la métaphysique à peu près comme Newton avait créé la physique ». En France la réception de la théorie de la gravitation de Newton sera lente, car elle mettra du temps à supplanter la théorie de René Descartes basée sur les tourbillons ; elle finit de s'imposer avec la parution de l'Encyclopédie.

Newton et l'alchimie

Synthèse entre le mécanisme et l'alchimie

Newton s'initie à la chimie en 1666 par la lecture du livre de Robert Boyle *Of Formes*, dont il tire un glossaire chimique. Il commence à étudier de façon très intensive l'alchimie en 1668 ou 1669 et poursuit ses recherches pendant au moins trente ans, jusqu'en 1696, à la suite de l'explosion de son laboratoire. Ses premières tentatives de publication de travaux (concernant l'optique) se soldant par des controverses épuisantes (avec Hooke notamment), Newton se réfugie dans le mutisme au moment où il plonge dans les recherches alchimiques. En outre, Newton fera certainement partie d'un réseau secret d'alchimistes probablement constitué à partir du cercle Hartlib de Londres. Il se choisit également le pseudonyme alchimique *Ieoua Sanctus Unus* qui signifie en français : « Jéhovah Unique Saint », mais qui est aussi une anagramme d'Isaac Neutonius. Durant plus de 25 ans, Newton conservera le secret sur ses activités et surtout sur ses contacts, desquels il reçoit de très nombreux ouvrages et traités alchimiques, qu'il annote et recopie jusqu'à se constituer une des plus vastes bibliothèques alchimiques de son époque.

Une grande partie de ses écrits de tradition alchimiste, non publiés, seront oubliés ou mal interprétés : lorsqu'en 1872 un descendant de sa sœur fait don à l'université de Cambridge des écrits et livres conservés par sa famille, le bibliothécaire renvoie à celle-ci une malle contenant les écrits « n'étant pas de nature scientifique » dont une grande partie de ses travaux alchimiques.

Au XVII^e siècle, l'alchimie a une réputation ambiguë. Souvent considérée populairement comme faisant partie du domaine des charlatans à cause de la quête de la transformation des métaux en or, l'alchimie est cependant continûment pratiquée et étudiée durant tout le XVII^e siècle par de nombreux philosophes de la nature parce qu'elle propose une vision d'ensemble cohérente pour la totalité des phénomènes naturels. En ce sens elle rejoint la philosophie mécaniste dans sa volonté d'une description universelle de la Nature :

« La transformation des corps en lumière et de la lumière en corps est très conforme au cours de la nature, qui semble se complaire aux transmutations ».

En revanche les deux philosophies sont séparées de façon fondamentale sur un point : pour les mécanistes la matière est inerte, composée de particules caractérisées par leur forme et dont le mouvement est régi uniquement par les lois simples du choc ou de la pression; pour les alchimistes la matière n'est que le véhicule de principes actifs qui régissent le monde selon des lois d'attraction et de répulsion, de copulation de principes mâle et femelle, et dont l'esprit est partie prenante : « Concevons les particules des métaux [...] comme douées d'une double force. La première est une force d'attraction et est plus forte, mais elle décroît rapidement avec la distance. La seconde est une force de répulsion qui décroît plus lentement, et, pour cette raison, s'étend plus loin dans l'espace ».

Néanmoins, pour les philosophes de l'époque de Newton, la séparation des deux philosophies n'est pas forcément évidente, et elles peuvent même être conçues comme complémentaires. Richard Westfall avance que ce sont peut-être les possibilités de description universelle offertes par le mécanisme et l'alchimie qui ont poussé Newton à ne se fermer aucune des deux voies de travail. L'intérêt de Newton pour l'alchimie résiderait dans une « rébellion » contre les limites restrictives imposées par la philosophie mécaniste ainsi que par la volonté de dépasser le mécanisme de René Descartes.

Dans un ouvrage intitulé *De la gravitation et de l'équilibre des fluides* (daté au plus tôt de 1668) il reproche notamment à Descartes un « athéisme » découlant de la stricte séparation du corps et de l'âme et de la supposition selon laquelle le monde matériel mécaniste n'a pas de dépendance envers Dieu. Le concept de force, et notamment de la force d'attraction gravitationnelle, bien qu'actuellement considéré comme le fondement même de la mécanique était en effet considéré à l'époque par les mécanistes comme une résurgence de l'occultisme et provoqua de vives réactions comme celle de Christiaan Huygens qui écrit en 1687 quelques jours après la sortie des *Principia* : « Je souhaite de voir le livre de Newton. Je veux bien qu'il ne soit pas Cartésien pourvu qu'il ne nous fasse pas des suppositions comme celle de l'attraction ».

Recherches et études alchimiques

Par l'ampleur de son travail dans ce domaine, Newton peut être considéré comme un alchimiste hors pair en Europe. De 1668 à 1675, Isaac Newton pratique l'alchimie. Certains considèrent que l'alchimie est présente à des degrés divers dans toute son œuvre scientifique et qu'elle permet d'en comprendre la genèse voire l'unité. Il établit une synthèse qui, appliquée à l'astronomie, lui fait tirer les conclusions suivantes : « La meilleure eau est attirée par le pouvoir de notre Soufre qui gît caché dans l'antimoine. Car l'antimoine était dénommé Aries [Bélier] par les Anciens. Parce qu'Aries est le premier signe du zodiaque dans lequel le Soleil commence à être exalté et que l'or est surtout exalté dans l'antimoine [...]. L'air engendre le Chalybs ou aimant, et cela fait apparaître l'air. Ainsi le père de celui-ci est le Soleil (l'or) et sa mère la Lune (l'argent). C'est ce que porte le vent dans son ventre ». Plus tard, il pense avoir découvert le mercure philosophique et donne la modalité précise de l'opération. Il fonde « l'hypothèse 3 » : « Tout corps peut être transformé en n'importe quel autre corps, et prendre successivement tous les degrés de qualités ».

Postérité

Diffusion des idées de Newton

La diffusion des idées de Newton ne s'est faite qu'assez lentement, mais fut tout à fait profonde sur le long terme. La première édition de l'ouvrage le plus célèbre de Newton, les *Principia*, rédigés de plus en latin, n'avait été imprimée qu'à 250 exemplaires. Une seconde édition de 750 exemplaires en 1713 a accéléré cette diffusion. Le premier scientifique français qui a pris connaissance de l'œuvre de Newton fut Maupertuis, qui lors de son séjour en Angleterre en 1728, a appartenu à la Royal Society de Londres. Maupertuis était membre de l'Académie des sciences en France. De retour à Paris, Maupertuis décida de faire reconnaître à ses pairs les théories de Newton : il publia un texte *Sur les lois de l'attraction* dans les Mémoires de l'Académie en 1732, puis un *Discours sur la figure des astres*. À cette occasion, Maupertuis noua une amitié avec Voltaire. Les travaux de Maupertuis sur Newton relancèrent les débats entre partisans et adversaires de ce dernier. C'est paradoxalement un homme de lettres, philosophe français de surcroît, qui va propager les idées de Newton : Voltaire fit un séjour en Angleterre entre 1726 et 1728 et fut très impressionné par les funérailles nationales de Newton auxquelles il assista en avril 1727. Lors de son séjour, parmi les nombreux contacts à haut niveau qu'il put avoir, Voltaire entretint des relations avec Samuel

Clarke, ami de Newton. Il n'eut de cesse, par la suite, de répandre les idées nouvelles dans une France qui était encore acquise à la théorie des tourbillons de Descartes. Voltaire écrivit deux essais sur Newton : *l'épître sur Newton* en 1736, et les *Éléments de la philosophie de Newton* en 1738. L'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert va également contribuer à répandre les théories de Newton, par l'intermédiaire des articles d'astronomie dont la rédaction a été prise en charge principalement par d'Alembert, mathématicien et philosophe, qui salue le génie de Newton dans le Discours préliminaire de l'Encyclopédie, et lui consacre bien sûr un article. Au XIX^e siècle, l'influence de Newton fut si profonde que Claude Henri de Rouvroy de Saint-Simon prit la gravitation universelle comme principe fondamental de son système philosophique. Au XX^e siècle, l'historien et philosophe des sciences Thomas Kuhn estime que Newton est à l'origine d'une des plus grandes révolutions scientifiques de l'Histoire.

Newton dans la littérature et les arts

Sur Newton, Alexander Pope a écrit une épitaphe restée célèbre : « La Nature et ses lois gisaient dans la nuit. Alors Dieu dit « que Newton soit ! » et la lumière fut ». Isaac Newton est l'un des personnages réguliers de la *Rubrique-à-brac* de Gotlib. Il y apparaît dans un gag récurrent mettant en scène la pomme qui, en lui tombant sur la tête, l'amène à concevoir la théorie de la gravitation. La pomme est remplacée, dans de nombreux gags, par des objets de toute sorte, généralement incongrus. Dans la série *Star Trek : La Nouvelle Génération*, Data joue régulièrement au poker dans son holodeck en compagnie d'Isaac Newton ainsi que d'Albert Einstein et Stephen Hawking.

La mécanique newtonienne aujourd'hui

Certains phénomènes qui restaient sans solution dans le cadre de la mécanique newtonienne, comme la précession du périhélie de Mercure, trouvent aujourd'hui une explication avec la théorie de la relativité générale d'Einstein. Notons en outre que la loi de Newton n'est pas capable de s'appliquer aux trous noirs, ni à la déviation de la lumière par la gravitation. Le philosophe des sciences Thomas Kuhn affirme que la théorie d'Einstein ne peut être acceptée que si l'on tient celle de Newton pour fautive. De surcroît, Einstein définit plutôt la gravitation par les torsions de l'espace-temps. Il s'agit d'une nouvelle révolution scientifique, qui s'accompagne d'un changement majeur de paradigme.

Newton est considéré comme l'un des plus grands génies et savants de l'histoire humaine.

G) Edmund Halley (1656-1742)

Edmond Halley (8 novembre 1656-14 janvier 1742) est un astronome et ingénieur britannique.

Ingénieur et scientifique pluridisciplinaire, il est surtout connu pour avoir le premier déterminé la périodicité de la comète de 1682, qu'il fixa par calcul à 76 ans environ. Lors du retour de cette comète en 1758, elle fut baptisée de son nom. C'est l'une des rares comètes qui portent un autre nom que celui de leur découvreur.

Enfance

La date de sa naissance est incertaine : Halley croyait pour sa part qu'il s'agissait du 8 novembre 1656. Il naquit dans le village de Hackney, petit village des environs de Londres, aujourd'hui absorbé par la capitale. De sa mère nous ne connaissons que le nom, Anne Halley, née Robinson. Son père se prénomma également Edmond, c'était un riche savonnier et marchand de sels qui avait bâti sa fortune sur les récentes horreurs de la peste bubonique, qui avait donné aux londoniens le goût de l'hygiène corporelle. Cet homme n'eut jamais peur de consacrer tout l'argent nécessaire à l'éducation de son fils, qui se révéla très tôt un garçon curieux et plein d'intérêt pour la science. De son enfance, on ne sait que peu de choses, hormis ce qu'Halley lui-même a bien voulu confesser : « Dès mes plus tendres années, je me suis adonné à l'étude de l'astronomie », écrit-il dans ses mémoires. « [Elle m'apportait] *un plaisir si grand qu'il est impossible de l'expliquer à qui n'a pas fait cette expérience* ».

Sans en avoir aucune preuve directe, il est toutefois probable que Edmond Halley, à peine âgé de 10 ans, fut amené à s'intéresser à l'astronomie, et plus particulièrement aux comètes, à la suite de l'apparition spectaculaire dans le ciel londonien des deux grandes comètes de 1664 et 1665, que la croyance populaire rendit responsables, pour la première, de la grande peste de Londres, et pour la seconde, du grand incendie qui ravagea la capitale. Quelques années plus tard, Edmund Halley, toujours grâce aux largesses et à l'encouragement de son père, entra à l'école Saint-Paul, une des meilleures de toute l'Angleterre, où le jeune homme se fit remarquer par ses brillantes aptitudes. En 1672, il entra au Queen's College d'Oxford, où il se fera remarquer de la même façon, mais où il a le malheur d'apprendre la mort de sa mère quelques mois plus tard, le 24 octobre 1672, peu avant son seizième anniversaire. Le 10 mars 1675, Edmond Halley eut la hardiesse d'écrire à l'*Astronomer Royal* d'Angleterre, John Flamsteed, pour lui signaler des erreurs dans les tables officielles des positions de Jupiter et de Saturne. Impressionné par les capacités et surtout l'enthousiasme du jeune homme, dont les calculs se sont révélés justes, mais qui a su dans sa lettre montrer tout à la fois le respect dû à ses aînés et l'enthousiasme de sa jeunesse, John Flamsteed l'aidera, l'année suivante, à publier, à l'âge de dix-neuf ans, son premier article scientifique dans les *Philosophical Transactions*, revue de la Royal Society de Londres.

Astronome, scientifique, ingénieur

Fort de la reconnaissance ainsi obtenue par la communauté scientifique, Halley décide de quitter Oxford sans passer son diplôme, et cela pour s'embarquer pour l'île Sainte-Hélène, afin d'y dresser la première carte du ciel austral. Il est soutenu dans cette expédition par la *Royal Society*, qui a réussi également à obtenir le soutien du roi Charles II. Son départ a lieu pour ses vingt-et-un ans, en novembre 1676. Il y restera dix-huit mois. De ces longs mois d'observation, Halley non seulement rapportera en Angleterre la carte la plus précise qui ait jamais été tracée du ciel austral, mais aussi plusieurs observations riches d'enseignements, dont notamment l'influence de la latitude sur la période des horloges à balancier (due à une différence infime de force centrifuge au niveau de l'équateur), et un recensement de nébuleuses encore jamais observées par les européens. Après l'observation d'un transit de Mercure devant le Soleil, il publia un exposé sur la méthode à utiliser pour déterminer la distance Terre-Soleil lors d'un transit de Vénus, sans hélas avoir l'occasion d'y procéder de son vivant.

Marin et océanologue

En 1690, il réalisa une cloche de plongée, alimentée en air par des barils lestés, et réussit à se maintenir sous l'eau avec cinq autres compagnons, pendant plus d'une heure et demie. « Grâce à ce moyen, j'ai laissé trois hommes pendant une heure trois quarts sous dix brasses d'eau, sans le moindre inconvénient pour eux, et dans une liberté d'agir aussi parfaite que s'ils avaient été à l'air libre ». Il perfectionna sa cloche, qu'il voulait utiliser pour explorer les épaves, et arriva à prolonger la durée du séjour sous-marin jusqu'à quatre heures, mais la lourdeur et la taille du dispositif le rendaient peu pratique, et il lui manquait les techniques et les matériaux modernes permettant en particulier de compresser fortement l'air. En 1698, il obtint des souverains britanniques, Marie II et Guillaume III d'Orange, le commandement d'un *pinque* de 52 pieds de long, le *Paramore*, et la direction de ce qui fut très probablement la première mission océanographique. Le *pinque* (un solide bateau de plan hollandais, aux formes renflées) mit à la voile en novembre 1698, mais Halley dut interrompre son voyage, et revenir à terre sept mois plus tard : les officiers du bord refusaient d'obéir à un civil. Halley, nanti par les souverains d'un brevet de « capitaine temporaire » de la Royal Navy, remit à la voile en septembre 1699. Il parcourut l'Océan du 50° Nord au 52° Sud, et réunit une moisson d'observations scientifiques, en particulier sur les variations du compas. Il parvint au Sud à la latitude des îles de *Géorgie du Sud*, qu'il reconnut mais sans en prendre possession : c'est James Cook qui s'en chargea en janvier 1775. Marin hors pair, il étudia, lors de ses voyages à bord du *Paramore*, la circulation atmosphérique (et en particulier les alizés, qu'il attribua au réchauffement de l'air sous l'équateur), les courants océaniques, et établit une carte détaillée de la déclinaison magnétique, la première carte précise d'isogones. Il conçut également la première carte météorologique, ancêtre de celles qui sont présentées chaque soir à la télévision. Passionné de la mer, il étudia les mœurs de beaucoup de créatures aquatiques, dont notamment la seiche et l'esturgeon. Il conçut même une méthode pour conserver vivants les carrelets, afin de les vendre en plein hiver.

Génie universel

Au contact d'Isaac Newton, Halley se demanda si l'attraction d'une comète passant trop près de la Terre pourrait déplacer les océans jusqu'à inonder des régions continentales : par cette hypothèse, il fut également un des premiers à essayer d'expliquer rationnellement le Déluge biblique. Il fut également le premier à s'interroger sur les conséquences d'une collision d'une comète avec la Terre. Il tenta de mesurer la taille de l'atome, mais sans succès. Esprit curieux de tout, il étudia également l'histoire romaine et les mécanismes d'horlogerie. De son propre aveu, Halley goûtait assez régulièrement à l'opium, mais sans tomber dans une dépendance physique ou psychique.

Traducteur

Halley traduisit de l'arabe le septième livre de la *Collection mathématique* de Pappus d'Alexandrie et les deux livres du traité d'Apollonius de Perge *Sur la section de rapport*, que l'on croyait perdu. Sur la base du septième livre de Pappus, il proposa en outre une reconstitution du livre perdu d'Apollonius intitulé *Sur la section d'aire*.

Edmond Halley et les comètes

Les comètes à l'époque de Edmond Halley

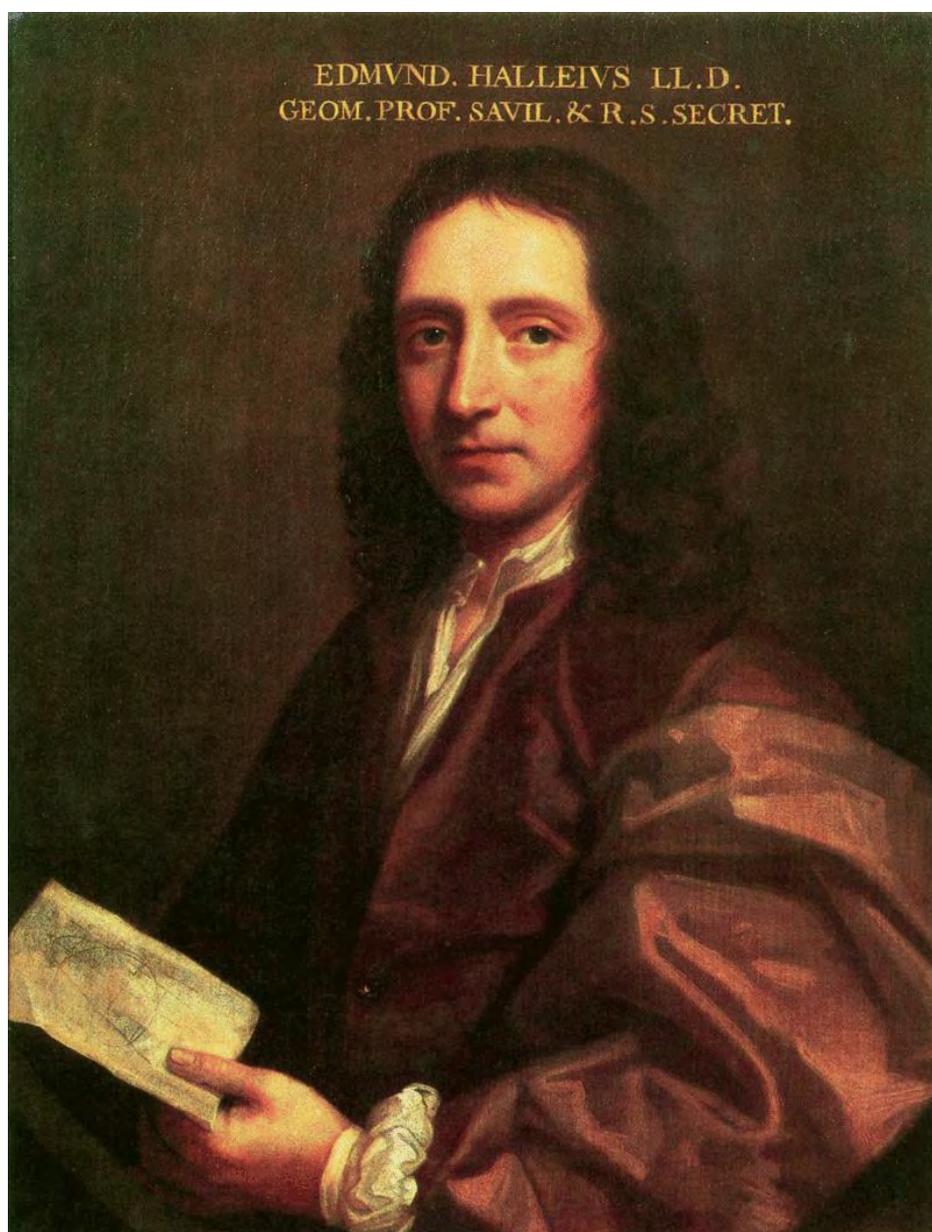


La comète de « Halley » sur la tapisserie de Bayeux – Son passage a eu lieu en 1066

L'idée que les comètes sont de nature identique à celle des planètes (c'est-à-dire un corps céleste en mouvement) et même qu'elles ont une orbite propre n'était pas inconnue des Anciens : « Quelques philosophes italiens et quelques-uns de ceux qu'on appelle pythagoriciens assurent que la comète est une des planètes, laquelle n'apparaît qu'à un très long intervalle et dont l'ascension est fort petite. » — Aristote, *Météorologie*, Livre I, chap. VI, § 3 Bien que cela ne soit pas clairement exprimé, cette opinion contient en germe l'idée du retour périodique des comètes, astres célestes par nature. Aristote, pour sa part, voyait dans les comètes des phénomènes purement atmosphériques (« sublunaires »), parce que le ciel, constitué de la « sphère des étoiles fixes », était déclaré comme « fixe et immuable » dans son système du monde. Cette conception aristotélicienne de l'univers perdura plusieurs siècles, jusqu'à ce que Tycho Brahe la remette en

question lors de l'observation de la supernova de 1572 : de toute évidence, contrairement à l'affirmation d'Aristote et de l'Église (alors aristotélicienne depuis Thomas d'Aquin), les cieux n'étaient pas immuables. Le coup fatal fut porté à cette conception du monde cinq ans plus tard, lors de l'apparition de la grande comète de 1577, qui demeura visible pendant de longs mois, permettant à Brahe d'échafauder avec ses collègues les hypothèses les plus diverses sur ces nouveaux corps célestes. Toutefois, si l'Église se vit obligée de reconnaître la nature « planétaire » des comètes, leur raison d'être, elle, n'était pas remise en cause : les comètes étaient toujours considérées comme des signes divins, annonciateurs le plus souvent du courroux du Créateur. À ce titre, les comètes se devaient donc d'être des phénomènes imprévisibles, comme pouvait l'être tout message divin motivé en réponse à une quelconque action humaine. À ce titre également, on considéra donc que, « par nature », l'orbite des comètes se devait d'être parabolique, hypothèse formulée par Johannes Hevelius dès le XVII^e siècle, chaque comète n'effectuant qu'un seul et unique passage autour du Soleil. Cette théorie s'accommodait aux observations de l'époque : en effet, au voisinage du Système solaire interne (donc du point de vue d'un observateur terrestre), il est très difficile de différencier une ellipse très allongée de l'extrémité d'une parabole. Or la précision des instruments de l'époque était insuffisante pour pouvoir différencier deux orbites si proches. L'orbite parabolique des comètes était donc la norme lorsque le jeune Edmund Halley commença à observer le ciel...

Le défi du savant



Portrait d'Edmond Halley peint par Thomas Murray en 1687

La première observation « officielle » d'une comète par Halley est celle qu'il fit en 1680, celle-là même qui inspira à Pierre Bayle ses *Pensées sur la comète*, sur un bateau qui traversait la Manche pour l'amener en France. C'est Jean-Dominique Cassini, découvreur de la division des anneaux de Saturne, qui l'accueillit chaleureusement à l'observatoire royal de Paris, et qui aiguillera le jeune homme sur l'hypothèse d'un retour périodique des comètes : « Monsieur Cassini m'a fait la faveur de me confier ses relevés de la comète alors que je me préparais à quitter la ville; en plus des observations qu'il effectua à la date du 18 mars (1681), il m'a soumis une théorie sur son mouvement, à savoir que la comète est celle-là même qui apparut à Tycho (Brahe) en l'an 1577, que sa révolution décrit un grand cercle dans lequel est comprise la Terre ».

Cassini avait en effet remarqué que trois comètes venaient de la même partie du ciel avec des vitesses similaires : si la paternité de l'hypothèse d'un retour périodique des comètes revient à Cassini, c'est Halley qui prendra le sujet suffisamment à cœur pour tenter de la valider scientifiquement. Mais, bien que le sujet semble passionner le jeune homme, ce n'est que dix ans plus tard qu'il s'attellera à sa démonstration. En 1682, il observe la comète peu spectaculaire qui devait plus tard porter son nom, mais n'en laisse que quelques notes dans son carnet d'observations. Sa rencontre avec Isaac Newton, en août 1684, semble ranimer l'ardeur scientifique de Halley, qui avait quelque peu sombré dans la routine après sa rencontre et son mariage avec Mary Tooke auprès de laquelle il vivra une idylle sincère et passionnée pendant près de cinquante-cinq ans.

Il mentionnera maintes fois dans sa correspondance l'immense intérêt qu'il portait à ce sujet d'étude : « L'opinion d'Aristote (...) à savoir que les comètes n'étaient rien d'autre que des vapeurs sublunaires ou des météores aériens [...] prévalut à ce point chez les Grecs, que cette partie la plus sublime de l'astronomie fut totalement négligée; depuis ce temps, nul ne trouve digne d'intérêt d'observer et de relater les errements et les trajectoires incertaines des vapeurs flottant dans l'éther ».

Halley et Newton se vouent une amitié profonde, et c'est ensemble qu'ils vont nourrir leur passion pour les comètes. Ainsi, reprenant point à point les observations déjà faites, et s'appuyant sur les travaux de Newton sur la loi de la gravitation, ils démontreront que les comètes devaient avoir les mêmes orbites que les planètes. Quand paraît l'œuvre majeure de Newton en 1687, les *Principia*, sans doute l'une des œuvres scientifiques les plus remarquables du XVII^e siècle, Halley rédige en guise de préface un vibrant hommage au génie de Newton.

C'est donc à l'âge de trente-neuf ans que Halley s'attaqua au problème qui plus tard allait lui assurer son plus grand titre de gloire. Pour cela, il entreprit de recenser tous les passages cométaires d'un passé récent et lointain. Il fut en cela aidé par la chance, son siècle se trouvant par un caprice de la nature plus fourni en comètes que les siècles précédents. Son enquête le fit remonter jusqu'aux témoignages de Pline l'Ancien ou de Sénèque. Il recalcula les orbites de 24 comètes ayant effectué un passage au périhélie entre 1337 et 1698. Ce fut un travail de titan, méticuleux et de longue haleine. Il parvint, au bout de plusieurs années, à isoler trois passages ayant eu lieu en 1531, 1607 et 1682.

	Longitude du périhélie	Inclinaison de l'orbite	Distance du soleil au périhélie (UA)
1531	301°39'	17°56'	0,587
1607	302°16'	17°2'	0,5868
1682	302°53'	17°56'	0,583

Bien que la correspondance semblât parfaite entre ces données, Halley s'inquiétait des légères différences qui ne pouvaient s'expliquer uniquement par des imprécisions de mesure. De plus, l'intervalle variait de plus d'une année. Halley formula l'hypothèse qu'une force quelconque, encore inexplicée, était responsable de tels écarts, mais ne pouvait s'en persuader, faute d'explication scientifique rigoureuse. S'en ouvrant à Newton, celui-ci lui suggéra de calculer les éventuelles perturbations gravitationnelles entre sa comète et d'autres comètes. Quelques calculs lui montrèrent la fausseté de cette hypothèse, mais celle-ci suffit à lui échauffer suffisamment l'esprit pour qu'il entreprit de calculer les perturbations provoquées par Jupiter et par Saturne (alors dernière planète connue du Système solaire). Les calculs montrèrent alors une corrélation presque parfaite entre sa théorie et les passages observés. Fort de ces résultats, il publie en 1705 les résultats de son travail dans un ouvrage intitulé *Synopsis de l'astronomie des comètes*, et dans lequel considère que les trois comètes observées respectivement par Apien en 1531, par Kepler en 1607 et par lui-

même en 1682 n'étaient qu'une seule et même comète et fait la prophétie entièrement scientifique du retour de cette comète pour Noël 1758. Halley savait ainsi, en rédigeant cette étude, qu'il ne verrait jamais de son vivant la confirmation de ces calculs, le prochain passage devant se réaliser l'année de ses cent deux ans.

C'est dans cet ouvrage qu'il mentionne également, en filigrane, la possibilité d'un « réservoir de comètes », qui sera deux siècles plus tard théorisé formellement par Jan Oort : « [...] ce qui me fait suspecter qu'il pourrait y en avoir un nombre bien plus grand (de comètes), qui se déplaçant dans des régions plus éloignées du Soleil, deviennent très obscures; et n'ayant pas de queue, passent vers nous en restant invisibles ».

Triomphe posthume

Quand Halley avait prédit le retour de la comète pour 1758, sa prophétie ne souleva guère l'enthousiasme : en effet, celle-ci se situait plus d'un demi-siècle dans l'avenir. Et quand Halley mourut en 1742, les notices nécrologiques insistèrent longuement sur ses expéditions maritimes, ses découvertes et sur la cloche à plongeurs dont il était l'inventeur, et passèrent sous silence sa prévision cométaire, qui tomba dans l'oubli. Toutefois, en 1757, un mathématicien français, Alexis Clairaut, prit la décision de reprendre les calculs de Halley afin, en améliorant la précision des calculs, de prédire plus finement la date de retour de la comète. Les délais étaient courts, les calculs devant être refaits avant la réapparition de celle-ci, afin de couper court à toute accusation de tromperie. Les calculs d'interaction gravitationnelle de la comète avec la Terre, Jupiter et Saturne étaient colossaux pour le faible délai dont il disposait, un peu plus d'un an. Il fit donc appel à Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande, et à la mathématicienne Nicole-Reine Lepaute. Après des mois de calculs, l'équipe des trois astronomes « officiels » annonça en novembre 1758 que la comète effectuerait son passage au périhélie le 13 avril 1759. La communauté astronomique mondiale – mettant en doute pour une partie d'entre elle la prédiction de Halley, ne voyant toujours rien venir pour la Noël 1758 – se remit donc à fiévreusement scruter le ciel. Le 25 décembre 1758, la comète fut observée à l'endroit exact où l'avait prédit Halley par un observateur près de Dresde, et atteignit son périhélie le 13 mars 1759, exactement un mois avant la date fixée par Lepaute, Lalande et Clairaut. Trois ans avant sa mort, E. Halley énonçait : « Si le retour prévu par nous pour l'année 1758 se réalise, l'impartiale postérité ne se refusera pas à reconnaître que ce fut un Anglais qui l'annonça pour la première fois ». Ce vœu fut largement exaucé, puisque la communauté des astronomes décida à la suite de ce succès posthume, de donner le nom de Halley à cette comète.

Théories de la Terre creuse

Edmund Halley émit en 1692 l'idée que la Terre était constituée d'une coquille creuse d'environ 800 km d'épaisseur, de deux coquilles concentriques intérieures, et d'un noyau central, ayant respectivement les diamètres approximatifs des planètes Vénus, Mars et Mercure. Ces coquilles seraient séparées par une couche atmosphérique, chacune d'elles aurait ses propres pôles magnétiques, et elles tourneraient à des vitesses différentes. Halley a proposé ce modèle pour expliquer des anomalies dans l'affichage des boussoles. Il émit l'hypothèse de l'existence d'une atmosphère lumineuse à l'intérieur de la Terre, celle-ci produisant les aurores boréales en s'échappant à l'extérieur. Il émit également l'hypothèse que les mondes intérieurs pourraient être habités. Ces hypothèses sont à rattacher aux nombreuses théories de la Terre creuse.

VI Le siècle des Lumières (XVIII^e siècle)

Les découvertes accomplies depuis l'émergence de l'optique instrumentale ont bouleversé la conception du ciel et de l'Univers, ôtant un certain crédit aux théories héritées de l'Antiquité. C'est pourquoi le public cultivé brûle de partager les découvertes les plus récentes, et veut comprendre les hypothèses scientifiques en débat, comme en témoignent, entre autres, certaines pièces de Molière. Fontenelle est l'un des premiers à répondre à cette attente : dans ses *Entretiens sur la pluralité des mondes habités* (1686), l'un des premiers ouvrages de vulgarisation scientifique, il expose le système de Copernic et la cosmologie cartésienne des tourbillons. Huygens reprend à son tour l'idée de Fontenelle de vulgariser l'astronomie lorsqu'il compose son *Cosmotheoros* (1698). Les ouvrages de ce genre se multiplient désormais avec Voltaire et ses *Éléments de la philosophie de Newton* (1738) jusqu'à Euler et ses *Lettres à une princesse d'Allemagne* (écrites en français, de 1761 à 1762) : c'est ainsi qu'aujourd'hui, l'astronomie est l'une des sciences naturelles les plus richement dotées en ouvrages de vulgarisation. Le modèle héliocentrique est largement décrit dans l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert. Un ensemble d'articles particulièrement bien documentés et référencés ont été consacrés à l'astronomie et renvoient à des articles de mécanique ou d'autres disciplines. Ils ont été rédigés par d'Alembert, Jean-Baptiste Le Roy, Jean Henri Samuel de Formey et Louis de Jaucourt. Dans le Discours préliminaire, d'Alembert rend hommage au génie de Newton. Il ne manque pas de critiquer l'Inquisition pour la condamnation de Galilée (1633). L'Encyclopédie va ainsi contribuer à diffuser dans la société française une représentation du monde héliocentrique, ce qui constituait à l'époque une révolution. Emmanuel Kant, s'appuyant sur les résultats des *Principia* de Newton, fut le premier (1755) à tenter d'expliquer la formation du système solaire par des considérations purement mécaniques. Le 3 juin 1769, l'explorateur James Cook, mettant à profit l'observation du transit de Vénus qu'il put effectuer à Tahiti, procéda à la première mesure directe des distances Terre-Vénus-Soleil, devançant l'infortuné astronome français Guillaume Le Gentil.

Bien qu'elle soit encore visible à l'œil nu par temps clair, du fait de sa marche apparente très lente liée à son éloignement, les Anciens ne considéraient pas **Uranus** comme une planète. John Flamsteed, qui fut le premier à l'observer à la lunette astronomique (23 décembre 1690), la catalogua comme l'étoile 34 Tauri. Le 13 mars 1781, William Herschel, voyant que cet astre était mobile par rapport aux autres étoiles, reclassa 34 Tauri comme une comète. L'idée qu'il existait une septième planète, inconnue des Anciens, revient à Nevil Maskelyne. Pour les astronomes contemporains, cette découverte fut si importante que même des décennies plus tard, l'endroit où l'on avait découvert Uranus pour la première fois restait marqué sur les cartes célestes. Herschel découvrit en 1787 les deux premiers satellites d'Uranus, Titania et Obéron, comme il avait mis en évidence en 1783 le mouvement de translation propre du Soleil vers les constellations d'Hercule et de la Lyre. Ainsi, le Soleil n'était plus qu'une étoile parmi d'autres, en mouvement à l'intérieur de la Voie lactée, perspective qui ouvrait de nouveaux horizons pour la connaissance du ciel.

A) Charles Messier (1730-1817)

Charles Messier, né à Badonviller (Meurthe-et-Moselle) le 26 juin 1730 et mort à Paris le 12 avril 1817, est un astronome français, éminent chasseur de comètes. Il est renommé pour avoir créé le fameux catalogue d'objets du ciel profond portant son nom. Charles Messier est le dixième d'une grande famille de douze enfants.

Il travaille avec Joseph-Nicolas Delisle à l'observatoire de l'Hôtel de Cluny. Charles Messier étudie scrupuleusement 44 comètes et en découvre 20 entre 1760 et 1801, parfois conjointement avec d'autres astronomes parmi lesquels figurent Pierre Méchain et Alexis Bouvard. Du 26 janvier 1760 au 12 avril 1798, Messier découvre douze comètes : C/1763 S1, C/1764 A1, C/1766 E1, C/1769 P1, D/1770 L1, C/1771 G1, C/1773 T1, C/1780 U2, C/1785 A1, C/1788 W1, C/1793 S2 et C/1798 G1. Le 10 janvier 1771, il est un des co-découvreurs de la grande comète C/1771 A1. Il observe (2) Pallas le 6 avril 1779, 23 ans avant sa découverte, note sa position et pense qu'il s'agit d'une étoile. Le 12 juillet 1801, il est le co-découvreur, avec Pons, Méchain et Bouvard, de la comète C/1801 N1. Louis XV l'appelait « Le furet des comètes ».



Charles Messier

Il faut cependant reconnaître que la renommée de Charles Messier est avant tout issue de son catalogue de 110 objets du ciel profond d'aspect diffus (amas stellaires et nébuleuses au sens de l'époque), catalogue qu'il produisit à l'intention des chercheurs de comètes afin d'éviter toute confusion avec ces objets fixes mais encore étranges. Aujourd'hui, ce catalogue n'est pas tant utilisé par le chasseur de comètes que par l'astronome amateur désireux d'avoir un aperçu des objets les plus spectaculaires qu'il pourra trouver dans le ciel nocturne. Il répertorie en effet la plupart des amas, nébuleuses et galaxies (qu'il ne décrit pas comme des galaxies mais comme des nébuleuses) les plus brillants du ciel boréal et, dans une moindre mesure, austral.

Sur ses vieux jours, Charles Messier a finalement été honoré quand Napoléon lui-même, en 1806, lui présente la Croix de la légion d'honneur. En retour, Messier perd une partie de sa réputation scientifique à cause d'un mémoire vouant la grande comète de 1769 à l'empereur, né à cette année-là. Il meurt à Paris le 12 avril 1817, à l'âge de 86 ans. Le canal Messier au sud du Chili, l'astéroïde (7359) Messier et un cratère lunaire de 11 km ont été nommés en son honneur.

B) Joseph-Louis Lagrange (1736-1813)

Joseph Louis, comte de Lagrange (en italien **Giuseppe Ludovico De la Grange Tournier**), né à Turin en 1736 et mort à Paris en 1813, est un mathématicien, mécanicien et astronome italien. Jusqu'à l'âge de trente ans il vit dans le Piémont, puis il séjourne vingt-et-un ans à Berlin avant de s'installer pour ses vingt-six dernières années à Paris.

Joseph Louis Lagrange naît de parents italiens. Élève brillant issu d'un milieu aisé, il étudie au collège de Turin. Il prend goût pour les mathématiques par hasard à l'âge de 17 ans après la lecture d'un mémoire de Edmund Halley portant sur les applications de l'algèbre en optique. Le sujet l'intéresse au plus haut point. Dès lors, il se passionne pour les mathématiques qu'il étudie seul et assidûment. Il devient rapidement un mathématicien confirmé et ses premiers résultats ne se font pas attendre. Dans une lettre adressée à Leonhard Euler, sans doute le plus grand mathématicien de l'époque, il jette les bases du calcul variationnel. Cet échange est le début d'une longue correspondance entre les deux hommes. Lagrange a alors 19 ans et enseigne à l'école d'artillerie de Turin où il fut nommé en 1755. Il fonde en 1758 l'Académie des Sciences de Turin qui publiera ses premiers résultats sur l'application du calcul variationnel à des problèmes de mécanique (propagation du son, corde vibrante...). En 1764, ses travaux sur les librations de la Lune (petites variations de son orbite) sont récompensés par le Grand Prix de l'Académie des sciences de Paris. Lagrange quitte sa ville natale en 1766 pour s'installer à Berlin, où il est nommé directeur de la classe mathématique de l'Académie de Berlin, succédant ainsi à Euler. Le roi Frédéric II de Prusse souhaitait que « le plus grand roi d'Europe » ait « le plus grand mathématicien d'Europe ». Il se marie un an plus tard mais n'aura pas d'enfants. Commencent alors vingt années de publications aussi régulières que le permet la santé fragile de Lagrange. Ses travaux, qui s'inscrivent dans les mathématiques et la mécanique, font de lui un nom incontournable dans ces domaines. Il se consacre à des problématiques variées : algèbre, calcul infinitésimal, probabilités, théorie des nombres, mécanique théorique, mécanique céleste, mécanique des fluides, cartographie... Ce sont plus de 80 mémoires qui sont publiés par Lagrange durant cette période berlinoise. Le décès de sa femme en 1783 après de longues années de maladie le plonge dans la dépression. Trois ans plus tard, la mort du roi Frédéric II (son protecteur) et l'influence croissante de Wöllner rendent sa position à Berlin inconfortable. Il reçoit de nombreuses propositions d'emplois venant d'Italie et de France. Le mathématicien convoité retient l'offre de l'Académie des sciences de Paris, qui n'inclut pas d'enseignement, et quitte définitivement Berlin en 1787.

En 1788, Lagrange, alors membre de l'Académie, publie son célèbre livre de mécanique analytique. Cet ouvrage, écrit lorsqu'il était encore en Allemagne, est l'aboutissement de ses travaux en mécanique et en analyse, ce qui en fait l'élément phare de son œuvre. Par chance, il n'est pas inquiété lors de la Révolution française. Il doit à son génie d'échapper aux mesures de répression contre les étrangers. Des arrêtés spéciaux du Comité de salut public lui permettent de continuer d'exercer ses fonctions. Il participe à partir de 1791 à la Commission des Poids et Mesures; il est donc l'un des pères du système métrique et de la division décimale des unités. Il se remarie en 1792 avec la fille d'un collègue astronome. L'Académie des sciences est supprimée en 1793 et un an plus tard, son collègue et ami Lavoisier est exécuté, victime de la Terreur. Cet événement le touche beaucoup ; il déclare à son sujet : « Il a fallu un instant pour couper sa tête, et un siècle ne suffira pas pour en produire une si bien faite. » En 1795, Lagrange enseigne les mathématiques à l'École normale de l'an III et, en 1797, il devient le premier professeur d'analyse de l'École polytechnique qui a été créée trois ans plus tôt. Sa voix fébrile et son accent italien font qu'il est peu apprécié des étudiants. Il continue à publier des ouvrages d'analyse, on peut citer : *Théorie des fonctions analytiques* (1797) et *Leçons sur le calcul des fonctions* (1800). Napoléon I^{er} montra son estime toute particulière pour Lagrange. Il meurt à Paris à l'âge de 77 ans, laissant derrière lui une œuvre importante qui a permis des avancées dans toutes les branches des mathématiques et de la physique de son époque. Surtout connu pour avoir introduit la méthode analytique en géométrie, il n'en a pas moins étudié les autres branches des mathématiques et a laissé d'importants travaux en trigonométrie et en mécanique.

Son œuvre

Fondateur du calcul des variations avec Euler et de la théorie des formes quadratiques, il démontre le théorème de Wilson sur les nombres premiers et la conjecture de Bachet sur la décomposition d'un entier en quatre carrés. On lui doit un cas particulier du théorème auquel on donnera son nom en théorie des groupes, un autre sur les fractions continues, l'équation différentielle de Lagrange. En physique, en précisant le principe de moindre action, avec le calcul des variations, vers 1756, il invente la fonction de Lagrange, qui vérifie les équations de Lagrange, puis développe la mécanique analytique, vers 1788, pour laquelle il introduit les multiplicateurs de Lagrange.

Il entreprend aussi des recherches importantes sur le problème des trois corps en astronomie, un de ses résultats étant la mise en évidence des points de libration (dits « points de Lagrange ») (1772).

Les points de Lagrange sont très importants en mécanique des corps en astronomie.

Voir le Glossaire de notre document sur le Système Solaire.

Il élabore le système métrique avec Lavoisier pendant la Révolution. Il est membre fondateur du Bureau des longitudes (1795) avec, entre autres, Laplace et Cassini. Il participe à l'enseignement de mathématiques de l'École normale de l'an III avec Joseph Lakanal, de l'École polytechnique (dès 1797) avec Monge et Fourcroy. Il a aussi été le fondateur de l'Académie de Turin (1758). En mécanique des fluides, il introduit le concept de potentiel de vitesse en 1781, bien en avance sur son temps. Il démontre que le potentiel de vitesse existe pour tout écoulement de fluide réel, pour lequel la résultante des forces dérive d'un potentiel. Dans le même mémoire de 1781, il introduit en plus deux notions fondamentales : le concept de la fonction de courant, pour un fluide incompressible, et le calcul de la célérité d'une petite onde dans un canal peu profond. Rétrospectivement, cet ouvrage marque une étape décisive dans le développement de la mécanique des fluides moderne.

Lagrange a aussi œuvré dans le domaine de la théorie des probabilités.

Principales publications

- *Réflexions sur la résolution algébrique* (1771). Ce mémoire a inspiré Abel et Galois.
- *Mécanique analytique* (1788), réédité dans *Œuvres de Lagrange*, vol. 11 et 12. Lagrange tente une approche entièrement algébrique de la mécanique, dégageant à partir du principe des travaux virtuels les notions de degré de liberté et d'intégrabilité. Il esquisse également les rapports entre systèmes discrets (nombre fini de masses en mouvement ou en équilibre) et systèmes continus (fluide).
- *Traité des fonctions analytiques*. L'auteur définit les fonctions comme des développements de Taylor-Lagrange convergents, ce qui lui permet de définir dérivée et primitive de façon originale, et de relever le problème des déterminations multiples d'une fonction en un point. C'est l'acte de naissance de la théorie des fonctions de la variable complexe, qui sera développée sur cette base par Cauchy, Poisson et Legendre.



Joseph-Louis Lagrange



Buste représentant Joseph-Louis Lagrange, décoré de la grand-croix de l'Ordre de la Réunion.

Distinctions

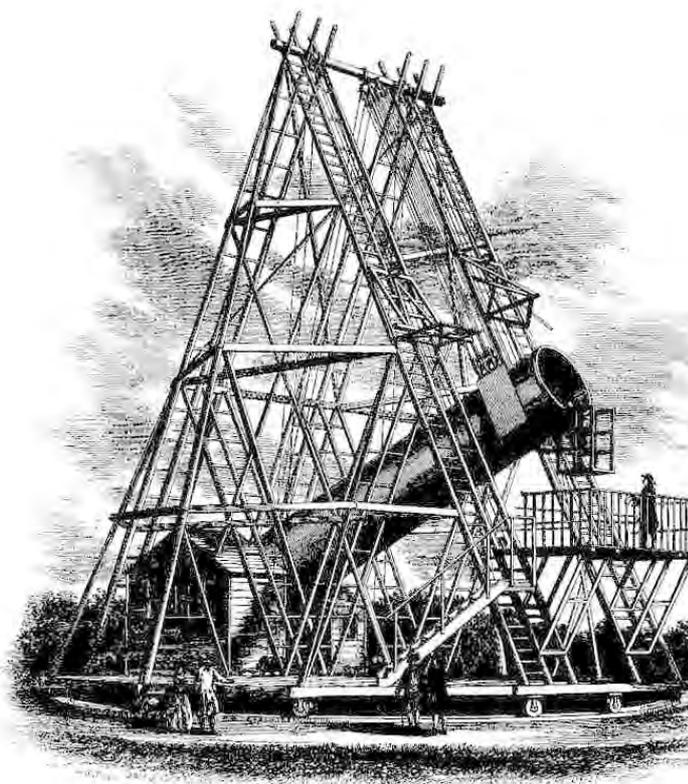
- Membre du Sénat conservateur le 4 nivôse an VIII (25 décembre 1799 : avec Monge et Laplace, il fait partie des savants nommés à siéger dans cette assemblée).
- Comte Lagrange et de l'Empire (lettres patentes du 24 avril 1808, Bayonne).
- Légion d'honneur :
 - Légionnaire (9 vendémiaire an XII), puis,
 - Grand officier de la Légion d'honneur (25 prairial an XII);
- Grand-croix de l'Ordre de la Réunion.

Hommages

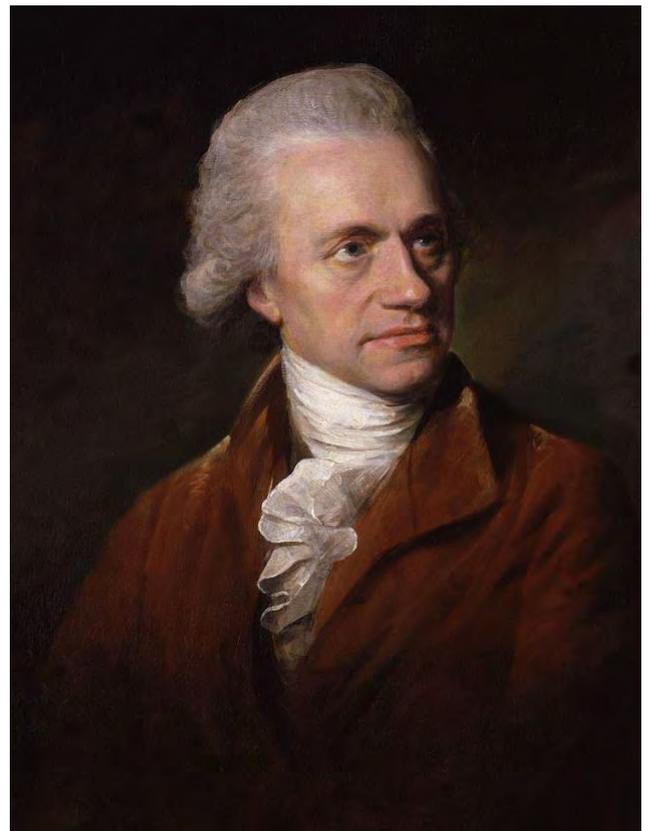
- Il est inhumé au Panthéon de Paris.
- Son nom est inscrit sur la Tour Eiffel.
- Un cratère lunaire porte son nom Lagrange.
- L'astéroïde (1006) Lagrangea a été nommé en son honneur.
- Une rue du 5^e arrondissement de Paris et une rue de Turin portent son nom.
- Le point de non-gravité Terre/Soleil, dont il avait prédit l'existence, s'appelle « le point de Lagrange L2 » en son honneur.

C) William Herschel (1738-1822)

William Herschel (né Friedrich Wilhelm Herschel) est un compositeur et astronome germano-britannique, né à Hanovre le 15 novembre 1738 et décédé le 25 août 1822 à Slough en Angleterre (à 83 ans). Son fils Sir John Herschel est également astronome.



Gravure représentant le télescope d'Herschel de 40 pieds (12 m) de focale et de 48 pouces (122 cm) d'ouverture



William Herschel

Premières années à Hanovre

Il passe son enfance à Hanovre, une ville du nord-ouest de l'Allemagne qui est sous la protection de la couronne de Grande-Bretagne et de son roi George II, où il reçoit une éducation musicale de la part de son père violoniste et hautboïste. Garde de régiment, il est appelé en Grande-Bretagne en 1756 afin de parer l'invasion française (guerre de Sept Ans).

Une vie de musicien

Libéré de ses obligations militaires, il gagne sa vie comme copiste musical à Londres puis directeur de la milice de Durham. En 1758, il obtient la direction des concerts d'Édimbourg avant de devenir organiste à Halifax en 1766, puis à Bath l'année suivante. Il demeure au centre de la vie musicale de cette ville pendant 10 ans tout en s'intéressant de plus en plus à l'astronomie. Sa musique, assez largement oubliée aujourd'hui, a été redécouverte avec bonheur en 2003 par les London Mozart Players, dans un disque consacré aux symphonies. Les œuvres "galantes" d'Herschel ont été composées entre 1759 et 1770 : 24 symphonies, une douzaine de concertos (violon, alto, hautbois, orgue), des sonates pour clavecin et de la musique religieuse. Un CD d'œuvres de Herschel interprétées à l'orgue par Dominique Proust a été publié en 1992.

L'astronome

Principales découvertes d'Herschel :

- En 1776, Herschel construit un télescope de sept pieds de distance focale (231 cm) et de 6,2 pouces de diamètre (17 cm), l'instrument qui grossit 227 fois étant achevé en 1778 et placé dans le jardin de sa maison du 19 New King Street à Bath dans le Somerset en Angleterre.
- Dans la nuit du 13 au 14 mars 1781, il découvre par hasard, au cours d'une observation, la planète Uranus, croyant d'abord avoir affaire à une comète.
- Aidé par sa sœur Caroline qui l'a rejoint à Bath, il devient un observateur hors pair, construisant lui-même ses lunettes et télescopes. Le roi George III, passionné d'astronomie, lui offre son soutien, notamment en 1782 en le nommant astronome du roi et lui allouant un traitement annuel de 200 livres (salaire bien modeste pour l'époque), afin qu'il puisse se consacrer entièrement à ses recherches scientifiques et astronomiques.
- En 1787, il découvre deux satellites d'Uranus, Obéron et Titania le 11 janvier et montre son télescope de 6 m de focale (20 pieds).
- En 1789, il construit un télescope de 12 m de long et de 1,22 m d'ouverture.
- On lui doit, entre autres, la découverte :
 - de la planète Uranus (13 mars 1781) et deux de ses satellites,
 - du mouvement du soleil vers ce qu'il nomma l'apex (1783),
 - Il dessine un modèle d'univers lenticulaire et semble avoir eu l'intuition des nébuleuses extragalactiques (1785),
 - des satellites Mimas et Encelade de Saturne (1789),
 - des rayons calorifiques (rayonnement infrarouge) (1800),
 - des étoiles binaires (1802),
 - de la forme (approximative) de notre Galaxie à partir du comptage d'étoiles (1785).
- Il a également publié plusieurs catalogues d'étoiles doubles (1782, 1785) et de nébuleuses (1786, 1789, 1802).

La Royal Society lui décerne la médaille Copley en 1781. En 1821, il devient le premier président de la Royal Astronomical Society. Le cratère martien Herschel (14,9°S 230,3°O, 304 km de diamètre) a été nommé en son honneur et celui de son fils, John Frederick William Herschel. L'Agence spatiale européenne (ASE ou ESA) a nommé Herschel un satellite d'observation astronomique en infrarouge et submillimétrique qui a été lancé en 2009 par une fusée Ariane V depuis leur poste en Guyane.

D) Pierre François André Méchain (1744-1804)

Pierre François André Méchain, né à Laon le 16 août 1744 et mort à Castellón de la Plana (Espagne) le 20 septembre 1804, est un astronome français. Avec son ami Charles Messier, il est l'un de ceux qui découvrirent le plus d'objets du ciel profond avant William Herschel. Pierre Méchain est le fils de l'architecte Pierre François Méchain. Il se révèle doué en mathématiques et en physique mais doit abandonner ses études par manque d'argent. Ses talents en astronomie sont remarqués par Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande (1732-1807) dont il devient l'ami et qui l'engage comme assistant. Il se lie également avec Charles Messier en 1774. Il est admis à l'Académie des sciences en 1782. Il est chargé de la Connaissance des temps en 1788 et remplit une mission géodésique entre 1792 et 1795, année où il entre au Bureau des longitudes. Il a laissé un fils, Jérôme Isaac Méchain, astronome comme son père. À Paris (XIV^e) une rue, et à Laon un lycée portent son nom en son honneur.



Pierre François André Méchain

Ses découvertes

Pierre Méchain est connu surtout pour avoir découvert une majeure partie des objets du catalogue Messier. Entre 1779 et 1782, il ne découvre pas moins de 29 objets dont il indique la position à son ami Charles Messier, qui les inclut dans son catalogue. Méchain découvre deux comètes en 1781 et détermine leur orbite grâce à ses connaissances mathématiques. En 1781 et 1799, il découvre pas moins de sept comètes. Il effectue également, avec Jean-Baptiste Delambre, une mesure de l'arc du méridien Dunkerque-Barcelone afin de déterminer précisément le mètre, mais il refuse de communiquer ses mesures à cause d'une anomalie de 3 secondes d'arc qui l'obsède jusqu'à sa mort. C'est d'ailleurs pour refaire la mesure qu'il retourne en Espagne, où il meurt de la fièvre jaune.

E) Pierre-Simon de Laplace (1749-1827)

Pierre-Simon de Laplace, né **Pierre-Simon Laplace**, comte Laplace puis 1^{er} marquis de Laplace, né le 23 mars 1749 à Beaumont-en-Auge et mort le 5 mars 1827 à Paris, est un mathématicien, astronome, physicien et homme politique français. Laplace est l'un des principaux scientifiques de la période napoléonienne. En effet, il a apporté des contributions fondamentales dans différents champs des mathématiques, de l'astronomie et de la théorie des probabilités. Il a été l'un des scientifiques les plus influents de son temps, notamment par son affirmation du déterminisme. Il a contribué de façon décisive à l'émergence de l'astronomie mathématique reprenant et étendant le travail de ses prédécesseurs dans son traité intitulé *Traité de Mécanique céleste* (1799-1825). Cet ouvrage majeur, en cinq volumes, a transformé l'approche géométrique de la mécanique développée par Newton en une approche fondée sur l'analyse mathématique. En 1799, il est nommé ministre de l'Intérieur sous le Consulat. Napoléon I^{er} lui confère le titre de comte de l'Empire en 1808. Il est nommé marquis en 1817, après la restauration des Bourbons.

L'ascension

Après de bonnes études effectuées dans sa Normandie natale, il part à Paris rencontrer l'un des plus influents mathématiciens de l'époque, d'Alembert. D'abord réticent, d'Alembert est rapidement convaincu des facultés de Laplace par un essai de quatre pages sur l'inertie. D'Alembert lui obtient un poste de professeur de mathématiques à l'École royale militaire. Il reçoit un salaire de 1 400 livres ainsi qu'un logement à l'école. Laplace envoie sa première contribution à l'Académie royale des sciences le 28 mars 1770. Elle

sera suivie de douze autres avant son élection comme membre adjoint en mars 1773. Il obtient une place d'examineur des aspirants et élèves de l'artillerie ainsi que la nouvelle place d'examineur des élèves ingénieurs-constructeurs de la marine. Il est enfin élu pensionnaire de la classe de mécanique de l'Académie le 23 avril 1785. En 1791, il devient membre de la commission des poids et mesures. De 1793 à 1795, il est remplacé par Sylvestre-François Lacroix comme examineur de l'artillerie. Il est adjoint de Lagrange à l'école normale de l'an III et y fait dix leçons du 1^{er} pluviôse au 21 floréal. Il est, de 1796 à 1798, examineur permanent de mathématiques à l'École polytechnique pour le recrutement des officiers de l'artillerie, des ingénieurs-constructeurs des vaisseaux, et des ingénieurs. Bien que très influent à l'École polytechnique, Laplace n'y enseigna jamais. Après la suppression de l'Académie royale des sciences, il est nommé membre résident de la section de mathématiques dans la 1^{re} classe de l'institut national le 20 novembre 1795 puis, en 1803, dans la section de géométrie. Il est nommé géomètre au Bureau des longitudes le 25 juin 1795.

Durant dix-sept ans, de 1771 à 1787, il produit une grande partie de sa contribution à l'astronomie. Son travail débute par un mémoire lu devant l'Académie française en 1773, dans lequel il montre que les mouvements planétaires sont restés voisins de ceux prévus par la théorie de Newton pour des longs intervalles de temps et il vérifie la relation jusqu'aux cubes de l'excentricité et de l'inclinaison des orbites. Plusieurs articles suivent sur certains points du calcul intégral, des différences finies, des équations différentielles et d'astronomie. Cependant certaines découvertes importantes proposées dans ces articles, comme les correspondances des harmoniques sphériques dans l'espace bidimensionnel, ont déjà été publiées par Adrien-Marie Legendre dans un article envoyé à l'Académie en 1783.

En 1795, il devient membre de la chaire de mathématiques du nouvel Institut des sciences et des arts, dont il est président en 1812. En 1816, il est élu à l'Académie française. En 1821, il devient lors de sa fondation le premier président de la Société de géographie. En outre, il devient membre de toutes les principales académies scientifiques d'Europe. Par son intense activité académique, il exerce une grande influence sur les scientifiques de son temps. Il est comparé à un Newton français pour son aptitude naturelle et extraordinaire pour les mathématiques. Il semble que Laplace n'ait pas fait preuve de modestie, puisque Anders Johan Lexell, en visite à l'Académie des sciences à Paris en 1780-1781, rapporte que « Laplace laisse vraiment transparaître le fait qu'il se considère le meilleur mathématicien de son temps en France ». Laplace est l'un des premiers savants à s'intéresser de près à la question de la stabilité à long terme du système solaire. La complexité des interactions gravitationnelles entre le Soleil et les planètes connues à l'époque ne semblait pas admettre une solution analytique simple. Newton avait d'ailleurs déjà pressenti ce problème après avoir remarqué des irrégularités dans le mouvement de certaines planètes ; il en déduisait d'ailleurs qu'une intervention divine était nécessaire de manière à éviter la dislocation du système solaire. Après ses travaux sur la mécanique céleste, Laplace se propose d'écrire un ouvrage qui aurait dû « offrir une solution complète au grand problème de la mécanique représenté par le système solaire et porter la théorie à coïncider aussi étroitement avec l'observation que les équations empiriques n'auraient plus trouver place dans les tables astronomiques ». Le résultat est contenu dans ses ouvrages *Exposition du système du monde* et *Mécanique céleste*. Sa *Mécanique céleste* est publiée en cinq volumes. Les deux premiers, publiés en 1799, contiennent les méthodes pour calculer les mouvements des planètes, pour déterminer leurs formes et pour résoudre les problèmes liés aux marées. Le troisième et le quatrième, publiés respectivement en 1802 et en 1805, contiennent les applications de ces méthodes et diverses tables astronomiques. Le cinquième volume publié en 1825 est principalement historique mais il fournit en appendice les résultats des dernières recherches de Laplace. Celles-ci sont très nombreuses mais il s'approprie beaucoup de résultats d'autres scientifiques avec peu ou pas de reconnaissance et les conclusions sont souvent mentionnées comme si elles étaient les siennes. D'après Jean-Baptiste Biot, qui aide l'auteur dans la relecture avant impression, Laplace est fréquemment incapable de retrouver les détails des démonstrations et est ainsi souvent conduit à réétudier ses résultats pendant plusieurs jours.

Mécanique céleste n'est pas seulement la traduction des *Principia Mathematica* dans le calcul différentiel, mais complète certaines parties que Newton n'avait pas été en mesure de détailler. Dans cet ouvrage, Laplace expose l'hypothèse de la nébuleuse selon laquelle le système solaire se serait formé à la suite de la condensation d'une nébuleuse. L'idée de la nébuleuse avait déjà été énoncée par Kant en 1755, mais il est probable que Laplace n'en fut pas informé. Laplace, qui avait effectué ses premiers travaux sur les

probabilités entre 1771 et 1774, en redécouvrant notamment après Thomas Bayes les probabilités inverses, dites loi de Bayes-Laplace, ancêtre des statistiques inférentielles, publie en 1812 sa *Théorie analytique des probabilités*. Dans cet ouvrage, Laplace donne des éléments déterminants à la théorie des probabilités dont il est considéré comme un des pères. En 1814, il publie son *Essai philosophique sur les probabilités*. Il est le premier à publier la valeur de l'intégrale de Gauss. Il étudie la transformée de Laplace. Il adhère à la théorie d'Antoine Lavoisier, avec qui il détermine les températures spécifiques de plusieurs substances à l'aide d'un calorimètre de sa propre fabrication. En 1819, Laplace publie un simple résumé de son travail sur les probabilités. Laplace est connu également pour son « démon de Laplace », lequel a la capacité de connaître, à un instant donné, tous les paramètres de toutes les particules de l'univers. Il formule ainsi le déterminisme généralisé, le mécanisme. L'état présent de l'univers est l'effet de son état antérieur, et la cause de ce qui va suivre. « Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée, la position respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers, et ceux du plus léger atome. Rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé seraient présents à ses yeux. » Dans cette perspective, l'auteur adopte une position déterministe, soit une position philosophique et scientifique capable d'inférer de ce qui est, ce qui sera. Ce concept de démon sera notamment remis en cause par le principe d'incertitude de Heisenberg.



Pierre-Simon de Laplace

La capacité et la rapidité avec laquelle Laplace réussit à changer d'opinion politique sont surprenantes. Adversaire de la dictature et ardent républicain, comme Lacépède, avant le 18 Brumaire, Laplace se rallia sans hésiter au gouvernement consulaire et au pouvoir grandissant du général Bonaparte. Laplace abandonne ses principes républicains (qui sont fidèlement le reflet des opinions du parti au pouvoir) et il implore le premier Consul de lui donner le poste de ministre de l'Intérieur. Napoléon, qui désire le soutien des hommes de science, accepte la proposition mais, en moins de six semaines, il fait remplacer le scientifique par son frère aîné Lucien Bonaparte. Le bulletin de Napoléon à sa démission est le suivant : « Géomètre de première catégorie, Laplace n'a pas tardé à se montrer un administrateur plus que médiocre ; de son premier travail nous avons immédiatement compris que nous nous étions trompés. Laplace ne traitait aucune question d'un bon point de vue : il cherchait des subtilités de partout, il avait seulement des

idées problématiques et enfin il portait l'esprit de l'infiniment petit jusque dans l'administration ». Ainsi Laplace perd sa charge mais il maintient sa fidélité. Il entre au Sénat conservateur à la création de ce corps, le 3 nivôse an VIII, dans le troisième volume de la *Mécanique céleste* il réalise une note dans laquelle il déclare qu'« entre toutes les vérités contenues dans celui-ci, la plus chère à l'auteur est la déclaration faite à sa dévotion envers le médiateur de l'Europe. » Dans le tirage vendu après la Restauration celle-ci est effacée. Lors de la formation des lycées, il fut nommé, le 18 décembre 1802, membre de la commission chargée de déterminer par une instruction réglementaire les parties à enseigner dans chaque classe de mathématiques. Il fut élu vice-président du Sénat en 1803, et chancelier de ce corps au mois de septembre de la même année. Ce fut Laplace qui, le 30 août 1805, fit au Sénat un rapport sur la nécessité d'abandonner le calendrier républicain pour reprendre l'ancien style. Il fut élu président de la Société Maternelle en 1811. Membre de la Légion d'honneur (19 vendémiaire an XII), grand officier (25 prairial suivant), créé comte de l'Empire le 24 avril 1808, grand-croix de l'ordre de la Réunion le 3 avril 1813, il n'en vota pas moins, en avril 1814, au moment où il est évident que l'Empire allait faillir, la déchéance de l'empereur, l'établissement d'un gouvernement provisoire et se dépêcha d'offrir ses services aux Bourbons. Pour l'en récompenser Louis XVIII le nomma pair de France (4 juin 1814) et le fit marquis (ordonnance royale et lettres patentes de 1817). Le marquis de Laplace se tint à l'écart pendant les Cent-Jours, et reprit après la seconde abdication, son siège à la Chambre haute; il vota pour la mort dans le procès du maréchal Ney.

En 1816, il présida la commission chargée de réorganiser l'École polytechnique. Il montra pour les Bourbons à la Chambre des pairs le même dévouement qu'au Sénat de l'Empire : « un de ses biographes a noté, avec justice, que la conclusion de son *Exposition du système du Monde* reflétait très exactement les variations de ses opinions politiques ».

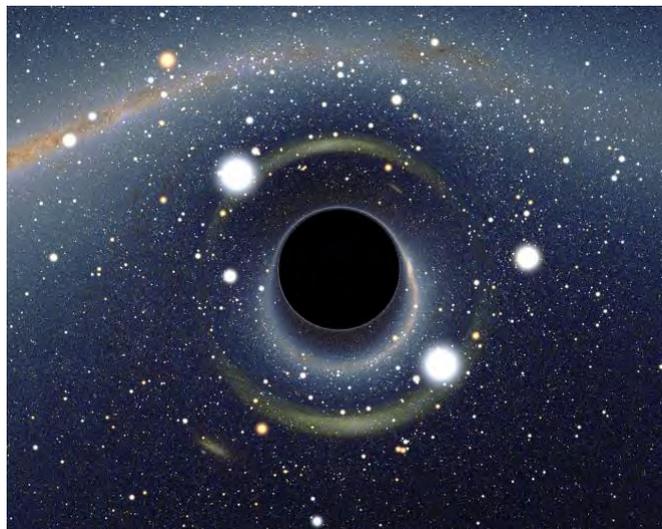
La connaissance de Laplace est utile pour les nombreuses commissions scientifiques auxquelles il appartient et probablement justifie la manière dont on ferma les yeux sur sa fausseté politique.

Vers la fin de sa vie, et spécialement pour les travaux de ses élèves, Laplace est généreux et une fois, il omet un de ses articles de sorte qu'un élève reçoive le mérite exclusif de la recherche. » Initié franc-maçon, il est membre du collège des grands officiers du Grand Orient de France en 1804. Laplace a publié un nombre considérable de travaux pour la réimpression desquels la Chambre des députés, en 1842, vota un crédit de 40 000 francs.

Contributions scientifiques

Mécanique céleste

Laplace apporte une importante contribution à la mécanique céleste en utilisant les conceptions lagrangiennes pour mieux expliquer le mouvement des corps. Il passe une grande partie de sa vie à travailler sur l'astronomie mathématique et son travail culmine avec la vérification de la stabilité dynamique du système solaire avec l'hypothèse que celui-ci consiste en un ensemble de corps rigides qui se meuvent dans le vide. Il établit seul l'hypothèse de la nébuleuse et il est un des premiers scientifiques à concevoir l'existence de sortes de trous noirs (que John Michell fut le premier à imaginer) dans le cadre de la physique classique. Selon l'hypothèse de la nébuleuse, le système solaire se serait développé depuis une masse globulaire de gaz incandescent qui tourne autour d'un axe passant par son centre de masse. En refroidissant cette masse se serait réduite et quelques anneaux concentriques se seraient détachés de son bord externe. Ces anneaux en se refroidissant se seraient condensés en planètes. Le soleil représenterait le noyau central de la nébuleuse qui, resté encore incandescent, continue à irradier. De ce point de vue, nous devrions nous attendre à ce que les planètes plus distantes soient plus vieilles que celles plus voisines du soleil. L'idée substantielle de la théorie, même avec quelques importantes modifications est acceptée encore aujourd'hui. Laplace montre qu'il pourrait y avoir des corps massifs dotés d'une gravité si grande que la lumière elle-même n'aurait pas une vitesse suffisante pour sortir de leur intérieur, une idée aujourd'hui rapprochée des trous noirs de la cosmologie moderne. Il suppose que certaines étoiles de la nébuleuse découvertes à l'aide des télescopes ne font pas partie de la Voie lactée et qu'elles sont elles-mêmes des galaxies.



Dessin d'un trou noir, objet astronomique dont l'existence fut conjecturée par Laplace

Au cours des années 1784 à 1787, il produit plusieurs mémoires contenant des résultats exceptionnels. Parmi ceux-ci, celui de 1784 qui est particulièrement relevé, réimprimé dans le troisième volume de la Mécanique Céleste, à l'intérieur duquel il détermine complètement l'attraction d'un sphéroïde sur une particule externe à lui. Ceci est mémorable pour l'introduction en analyse des harmoniques sphériques ou coefficients de Laplace. Si les coordonnées de deux points sont (r, μ, ω) et (r', μ', ω') , et si $r' \geq r$, alors la réciproque de leur distance peut être développée en fonction du rapport de r/r' , et les coefficients respectifs sont les coefficients de Laplace. Leur utilité dérive du fait que chaque fonction avec des coordonnées d'un point sur la sphère peut être développée en série de cette manière. Cet article est aussi très important pour le développement de l'idée de potentiel, appropriée et utilisée par Joseph-Louis Lagrange dans ses mémoires de 1773, 1777 et 1780. Laplace montre que le potentiel satisfait toujours à l'équation différentielle.

Entre 1784 et 1786, il publie un mémoire concernant Jupiter et Saturne où il vérifie, par l'intermédiaire des séries perturbatives, que dans des temps très longs, l'action réciproque des deux planètes ne peut jamais influencer significativement sur les excentricités et sur les inclinaisons de leurs orbites. Il fait noter que les particularités du système de Jupiter sont dues au fait que les mouvements moyens de Jupiter et Saturne sont très voisins de la commensurabilité. Il découvre aussi la cyclicité du mouvement des deux planètes estimée à peu près à 900 ans, les deux planètes paraissent exécuter des accélérations et des décélérations réciproques. De telles variations étaient déjà notées par Joseph-Louis Lagrange, mais seul Laplace les rattacha à un mouvement cyclique, confirmant l'idée que le système solaire présente des mouvements non occasionnels même à grande échelle temporelle. Les développements de ses études sur le mouvement planétaire sont exposés dans ses deux mémoires de 1788 et de 1789. L'année 1787 est rendue mémorable par les analyses de Laplace sur les relations entre l'accélération lunaire et les changements séculaires dans l'excentricité de l'orbite de la Terre : cette recherche complète la démonstration de la stabilité du système solaire entier. Il cherche par exemple à expliquer comment le mouvement orbital de la Lune subit une très légère accélération qui fait varier la longueur du mois lunaire d'une seconde en trois mille ans en attribuant la cause à une lente variation de l'excentricité terrestre. En vérité, il a été démontré successivement que de telles accélérations sont dues à l'attraction réciproque qui tend à synchroniser le mouvement de révolutions et de rotations des corps.

Physique

La théorie de l'attraction capillaire est due à Laplace, qui accepte l'idée proposée par Francis Hauksbee dans Philosophical Transactions en 1709, selon laquelle le phénomène est dû à une force d'attraction qui est imperceptible à une distance raisonnable. Il ne développe que partiellement l'étude de l'action d'un solide sur un liquide et de l'action réciproque de deux liquides, qui est complétée ultérieurement par Carl Friedrich Gauss. En 1862 Lord Kelvin (Sir William Thomson) démontre que, si nous supposons le caractère moléculaire de la matière, les lois de l'attraction peuvent être dotées des lois de Newton de la gravitation. Laplace en 1816 est le premier à mettre en évidence explicitement le motif pour lequel la théorie de Newton du mouvement oscillatoire fournit une valeur imprécise de la vitesse du son : la vitesse effective est

supérieure à celle calculée par Newton, à cause de la chaleur développée par la compression imprévue de l'air, qui augmente l'élasticité et donc la vitesse du son transmis. Les recherches de Laplace en physique pratique se limitent à celles réalisées avec Antoine Lavoisier dans les années 1782 à 1784 sur la chaleur massique de différents corps.

Théorie des probabilités

Alors qu'il mène plusieurs recherches en physique, un autre thème auquel il dédie ses forces est la théorie des probabilités. Dans son *Essai philosophique sur les probabilités*, Laplace formalise la démarche mathématique de la logique par induction basée sur les probabilités, que nous reconnaissons aujourd'hui comme celle de Thomas Bayes. En 1774, il déduit le théorème de Bayes sans être probablement au courant du travail (publié en 1763) de Thomas Bayes (mort en 1761). Toujours en 1774 il explicita l'intégrale de Gauss. En 1779, Laplace indique la méthode pour estimer le rapport des cas favorables ramenés au nombre total de cas possibles. Ceci consiste à considérer les valeurs successives d'une quelconque fonction comme les coefficients du développement d'une autre fonction avec référencement à une variable différente. Cette seconde fonction est donc appelée la fonction génératrice de la précédente. Laplace démontre comment, par le moyen de l'interpolation, ces coefficients peuvent être déterminés à partir de la fonction génératrice. Ensuite, il traite le problème inverse, en trouvant à partir des coefficients la fonction génératrice au moyen de la résolution d'une équation aux différences finies. La méthode est peu pratique et, compte tenu des développements successifs des analyses, rarement utilisée aujourd'hui. Laplace formule et démontre le premier la forme générale du théorème central limite, en 1809. Il avait déjà, 20 ans auparavant, amélioré le résultat d'Abraham de Moivre, le théorème de Moivre-Laplace, qui est un cas très particulier du théorème central limite. Toutefois, n'ayant pas perçu le premier le lien entre la loi normale et la loi des erreurs, Laplace n'est pas unanimement considéré comme le père de la loi normale. Il donne cependant, *a posteriori*, une explication du lien entre la loi normale et la loi des erreurs bien plus convaincante que celle de Gauss. Son traité *Théorie analytique des probabilités* inclut un exposé de la méthode des moindres carrés, important témoignage de la paternité de Laplace sur les méthodes analytiques. La méthode des moindres carrés, par l'intermédiaire de nombreuses observations, est expliquée empiriquement par Carl Friedrich Gauss et Adrien-Marie Legendre, mais le quatrième chapitre de ce travail contient une démonstration formelle de celui-ci, sur laquelle depuis s'est basée toute la théorie des erreurs. La deuxième édition du traité (1812) contient (voir Livre II, chapitre IV section 21) la première formulation du théorème central limite **vectorel**, crucial, par exemple, pour ses applications en statistiques, ou encore pour la convergence des marches aléatoires vers le mouvement Brownien.

Principe de Laplace

Nom attribué par Théodore Flournoy dans son *Des Indes à la planète Mars : étude sur un cas de somnambulisme avec glossolalie* (1899) à cet aphorisme : « Le poids des preuves doit être proportionné à l'étrangeté des faits ». Flournoy résume ainsi le propos de Laplace, qui se lit :

« Nous sommes si éloignés de connaître tous les agents de la nature, et leurs divers modes d'action ; qu'il ne serait pas philosophique de nier les phénomènes, uniquement parce qu'ils sont inexplicables dans l'état actuel de nos connaissances. Seulement, nous devons les examiner avec une attention d'autant plus scrupuleuse, qu'il paraît plus difficile de les admettre ; et c'est ici que le calcul des probabilités devient indispensable, pour déterminer jusqu'à quel point il faut multiplier les observations ou les expériences, afin d'obtenir en faveur des agents qu'elles indiquent, une probabilité supérieure aux raisons que l'on peut avoir d'ailleurs, de ne pas les admettre ». — Pierre-Simon de Laplace

Mathématiques

Parmi les découvertes mineures de Laplace en mathématiques pures, on peut mentionner sa discussion (avant Alexandre-Théophile Vandermonde) de la théorie générale des déterminants en 1772 : sa démonstration que n'importe quelle équation paire doit avoir au moins un facteur quadratique réel, sa réduction de la solution des équations différentielles linéaires à intégrales définies ; et sa solution à l'équation différentielle linéaire partielle du second ordre. Il est l'inventeur de la méthode de variation des constantes, permettant de résoudre les équations différentielles linéaires avec second membre, lorsque l'on connaît la solution de l'équation sans second membre. Il est aussi le premier à considérer les difficiles problèmes dans les équations aux différences mixtes, et à démontrer que la solution d'une équation aux différences finies de premier grade et du second ordre pourrait être toujours obtenue sous la forme d'une

fraction continue. En plus de ces découvertes originales, il détermine, dans sa théorie des probabilités, les valeurs des plus communes intégrales définies; et dans le même livre, il donne la démonstration générale du théorème énoncé par Joseph-Louis Lagrange pour le développement en série d'une fonction quelconque impliquée au moyen de coefficients différentiels. La transformée de Laplace, par contre, bien qu'elle soit appelée ainsi en son honneur parce qu'il l'utilisa dans son travail sur la théorie des probabilités, fut découverte à l'origine par Leonhard Euler. La transformée de Laplace apparaît dans toutes les branches de la physique mathématique, champ d'étude auquel Laplace contribua de manière importante.

Le déterminisme

À la différence de beaucoup d'autres mathématiciens, Laplace ne donne pas aux mathématiques un statut particulier, il y voit plutôt un instrument utile pour la recherche scientifique et pour les problèmes pratiques. Par exemple, Laplace a considéré l'analyse comme un outil pour affronter les problèmes physiques, tout en se montrant extrêmement habile pour inventer les concepts dont il a besoin pour atteindre cet objectif. Tant que ses résultats ne sont pas avérés, il ne se préoccupe pas d'expliquer les phases démonstratives ; il ne soigne pas l'élégance; pour lui, n'importe quel moyen est bon s'il permet de résoudre le problème qui le préoccupe. Il croit fermement au déterminisme causal comme il l'écrit dans l'introduction de son *Essai philosophique sur les probabilités* : « Nous devons donc envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée, et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'Analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle et l'avenir, comme le passé serait présent à ses yeux. »

L'existence de Dieu

Laplace est célèbre pour une boutade par laquelle, devant Napoléon, il aurait relégué Dieu au rang de supposition. Selon Hervé Faye, ce n'est pas Dieu que Laplace traitait d'hypothèse, mais seulement son intervention en un point déterminé :

« Comme le citoyen Laplace présentait au général Bonaparte la première édition de son *Exposition du Système du monde*, le général lui dit : “Newton a parlé de Dieu dans son livre. J'ai déjà parcouru le vôtre et je n'y ai pas trouvé ce nom une seule fois.” À quoi Laplace aurait répondu : “Citoyen premier Consul, je n'ai pas eu besoin de cette hypothèse.”

Dans ces termes, Laplace aurait traité Dieu d'hypothèse. [...]. Mais Laplace n'a jamais dit cela. Voici, je crois, la vérité. Newton, croyant que les perturbations séculaires dont il avait ébauché la théorie finiraient à la longue par détruire le système solaire, a dit quelque part que Dieu était obligé d'intervenir de temps en temps pour remédier au mal et remettre en quelque sorte ce système sur ses pieds. C'était là une pure supposition suggérée à Newton par une vue incomplète des conditions de stabilité de notre petit monde. La science n'était pas assez avancée à cette époque pour mettre ces conditions en évidence. Mais Laplace, qui les avait découvertes par une analyse profonde, a pu et dû répondre au premier Consul que Newton avait, à tort, invoqué l'intervention de Dieu pour raccommoquer de temps en temps la machine du monde, et que lui Laplace n'avait pas eu besoin d'une telle supposition ». L'anecdote est parfois rapportée avec des détails supplémentaires, mais contradictoires :

- dans la préface de son édition de Lucrèce, Félix Blanchet rapporte que Laplace aurait alors répondu à Napoléon : « Dieu est une jolie hypothèse qui explique bien des choses »;
- selon d'autres sources, c'est le mathématicien Lagrange qui se serait écrié : « Ah ! c'est une belle hypothèse. Elle explique beaucoup de choses »;
- selon Richard Dawkins Laplace aurait alors répondu que si cette hypothèse explique « tout », elle ne permet de prédire « rien » et n'entraîne donc pas dans son domaine d'étude.

Quelles que soient les paroles réellement échangées avec Napoléon, Laplace ajouta le nom de « Dieu » dans les éditions suivantes de son *Exposition du Système du monde*. L'analyse du passage semble confirmer que le débat ne portait pas sur l'existence de Dieu, mais sur la nécessité de son intervention directe et spéciale pour maintenir le monde dans l'ordre. Pour Newton, une intervention divine était nécessaire pour remettre régulièrement en ordre le système solaire. Laplace cite la critique de Leibniz : « C'est avoir des idées bien étroites de la sagesse et de la puissance de Dieu ».

Laplace interroge : « Cet arrangement des planètes, ne peut-il pas être lui-même un effet des lois du mouvement, et la suprême intelligence que Newton fait intervenir, ne peut-elle pas l'avoir fait dépendre d'un phénomène plus général ? ».

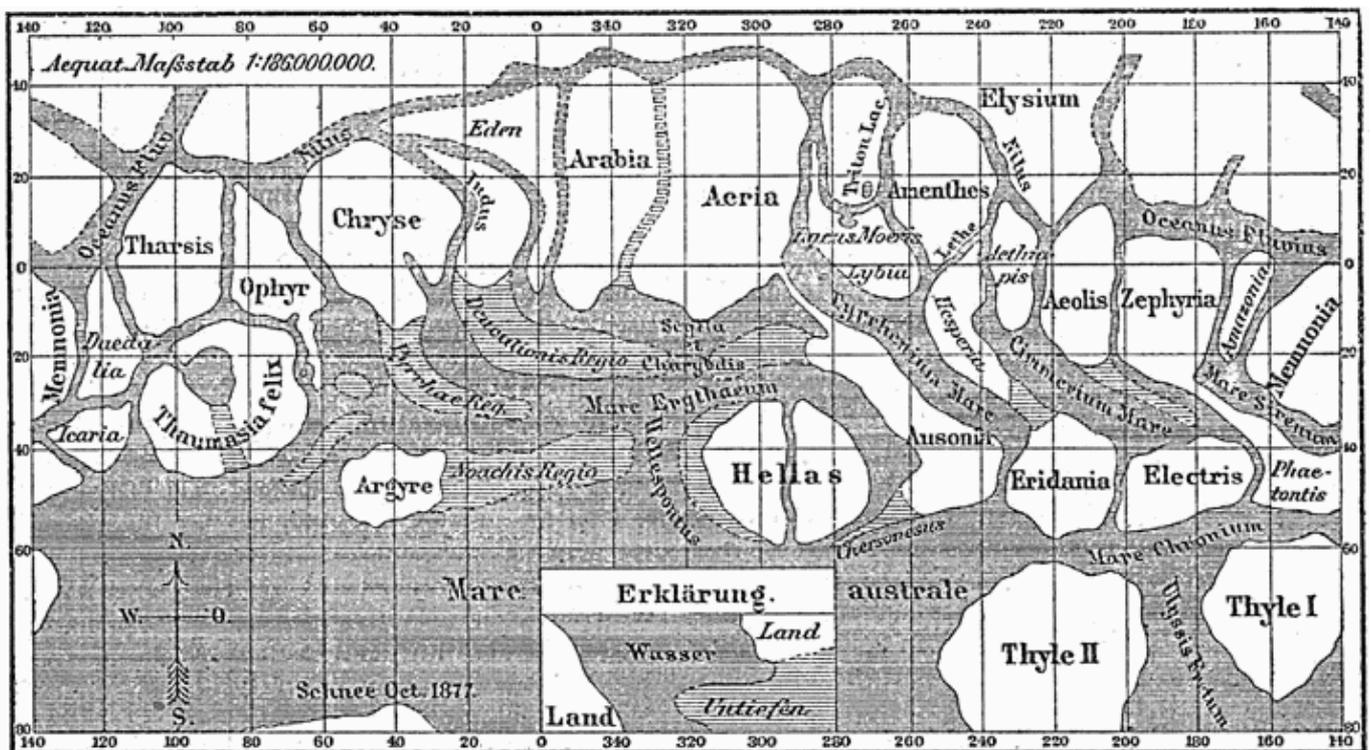
Il a déjà cité le mot de Newton : « Cet admirable arrangement du soleil, des planètes et des comètes ne peut être que l'ouvrage d'un être intelligent et tout-puissant ». Laplace n'entend pas à nier cet argument, mais, au contraire, le renforcer, car il commente : « Pensée dans laquelle il se serait encore plus confirmé, s'il avait connu ce que nous avons démontré, savoir que les conditions de l'arrangement des planètes et des satellites, sont précisément celles qui en assurent la stabilité ». Autrement dit : la Cause première n'a pas seulement donné aux astres un ordre précaire requérant une soigneuse maintenance, mais un ordre stable. Malgré la légende, Laplace n'était donc pas athée. Le chimiste Dumas, ami intime de Laplace, disait de lui : « Il a fourni aux matérialistes leurs plus spécieux arguments sans partager leurs convictions ». Il écrit à son fils, le 17 juin 1809 : « Je prie Dieu qu'il veille sur tes jours. Aie-Le toujours présent à ta pensée, ainsi que ton père et ta mère ». Il mourut en chrétien, entouré de deux prêtres catholiques, après avoir reçu les derniers sacrements de l'Église.

Hommages

- L'astéroïde (4628) Laplace a été nommé en son honneur.
- Son nom est inscrit sur la Tour Eiffel.
- Depuis 1864, la rue Laplace dans le 5^e arrondissement de Paris, près du Collège de France porte son nom.
- Un bâtiment du CNES porte son nom.
- Le marquis de Laplace repose dans un tombeau au nord de la chapelle de Saint-Julien-de-Mailloc. Sur le fronton on rappelle les travaux du savant sur la mécanique céleste, le système du monde et la théorie analytique des probabilités.

VII Le XIX^e siècle

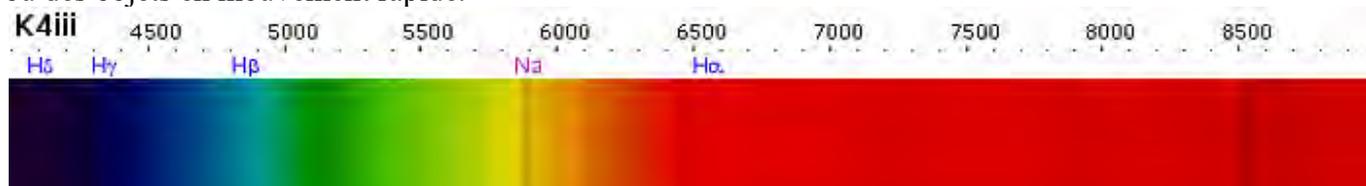
Enhardis par le succès d'Herschel, les astronomes se mirent en chasse de nouvelles planètes : c'est ainsi qu'ils tombèrent sur la ceinture d'astéroïdes orbitant entre Mars et Jupiter. Alors qu'un siècle plus tôt on avait pris Uranus pour une étoile et non une planète, on disposa bientôt de suffisamment de données observationnelles pour reconnaître l'irrégularité du mouvement de cet astre. Les irrégularités furent attribuées à l'attraction d'une planète voisine, encore inconnue, dont Le Verrier avait calculé la position mathématiquement et que Johann Gottfried Galle devait finalement découvrir en 1846 et que l'on baptisa Neptune. Galilée l'avait déjà dessinée le 27 décembre 1612, mais n'y voyait qu'une étoile. À cette époque, les développements scientifiques concernent essentiellement les principes physiques de l'observation des cieux, c'est-à-dire l'optique. William Herschel découvre la lumière infrarouge (1800), William Hyde Wollaston les raies d'absorption dans le spectre de la lumière solaire (1802). Indépendamment de Wollaston, Joseph von Fraunhofer décrit les raies de Fraunhofer (1813) et, un an plus tard, invente le spectroscopie. Grâce aux travaux de Kirchhoff et de Bunsen, l'existence de ces raies d'absorption recevra dès 1859 une interprétation physique qui est la base des méthodes de l'astrophysique.



Carte de la surface de Mars d'après Schiaparelli.

Un pas supplémentaire est accompli par la substitution de la photographie à l'œil en tant qu'instrument d'observation du ciel. La première reproduction par exposition à la lumière a été développée par Nicéphore Niépce (1826). John William Draper prend la première photographie de la Lune en 1840 au moyen d'un daguerréotype. Désormais, non seulement les observations astronomiques gagnaient en objectivité, mais il devenait possible, par une exposition de plusieurs heures, d'obtenir une luminosité suffisante pour rendre certains détails visibles. L'un des premiers astronomes à en faire usage fut le père jésuite Angelo Secchi, directeur de l'observatoire du Vatican ; il est également reconnu comme l'un des pionniers de l'analyse spectrale. Reprenant des calculs de 1844, Friedrich Wilhelm Bessel découvrit en 1862 une étoile compagne de Sirius dans la constellation du Grand Chien (Sirius B), qui s'avéra par la suite être une étoile naine de densité particulièrement élevée. Asaph Hall découvrit en 1877 les deux satellites de Mars et Schiaparelli les soi-disant « canaux martiens », qui par la suite donnèrent crédit aux spéculations sur l'existence d'un peuple de « Martiens ». Gustav Witt signala en 1898 la découverte de l'astéroïde Éros. Angelo Secchi poursuivit dans la voie engagée par Kirchhoff en répertoriant les étoiles selon leur spectre lumineux. Il était en effet convaincu que les étoiles se répartissaient selon une gradation logique à grande échelle. À l'aide d'un spectrographe, Secchi classa ainsi les étoiles en quatre catégories : étoiles de type I,

II, III et IV (classe spectrale). Cette division spectrale prit une importance accrue lorsque l'on s'aperçut qu'elle correspondait à la température superficielle des astres. Grâce à l'analyse spectrale, Secchi avait compilé le premier catalogue spectral de l'histoire de l'astronomie : sa tentative sera reprise en 1890, par un groupe d'astronomes, parmi lesquels Williamina Fleming, Antonia Maury et Annie Jump Cannon. William Huggins, après avoir lu le mémoire de Kirchhoff sur l'identification des éléments chimiques d'après leur spectre, décida de se consacrer à ce champ de recherche. Se servant précisément d'un spectrographe, il commença ses recherches sur les autres astres : il isola dans les comètes des indices de présence d'hydrocarbures gazeux, et en 1866 il pointa son instrument sur une nova apparue dans la Couronne boréale, s'apercevant qu'il s'y produisait une gigantesque éruption d'hydrogène et d'autres gaz. Il lança par là l'étude des mécanismes des novæ, dans lesquelles il voyait d'ailleurs la genèse des étoiles, ou des objets en mouvement rapide.



Le spectre d'une étoile et les éléments chimiques qu'il révèle.

Joseph Lockyer découvrit que le spectre solaire manifestait la présence d'un élément inconnu, qu'il baptisa hélium. Sa découverte s'avéra fondamentale pour l'astronomie, car l'hélium est une substance clef du processus évolutif des étoiles. C'est en 1890, au cours d'un voyage en Grèce, qu'observant l'orientation caractéristique des temples grecs il constata que leur axe était aligné dans la direction du lever et du coucher du Soleil. Il supposa alors que les temples égyptiens pouvaient aussi manifester une orientation caractéristique. Il entreprit ainsi l'étude de quelques monuments, relevant notamment que sept temples égyptiens étaient orientés selon le lever de Sirius. Les découvertes de Lockyer firent rapidement sensation dans le monde savant. Il trouva ensuite l'orientation du temple d'Amon-Rê à Karnak, et fit enfin porter ses recherches sur les alignements de Stonehenge, se risquant ainsi à établir la date de leur érection.

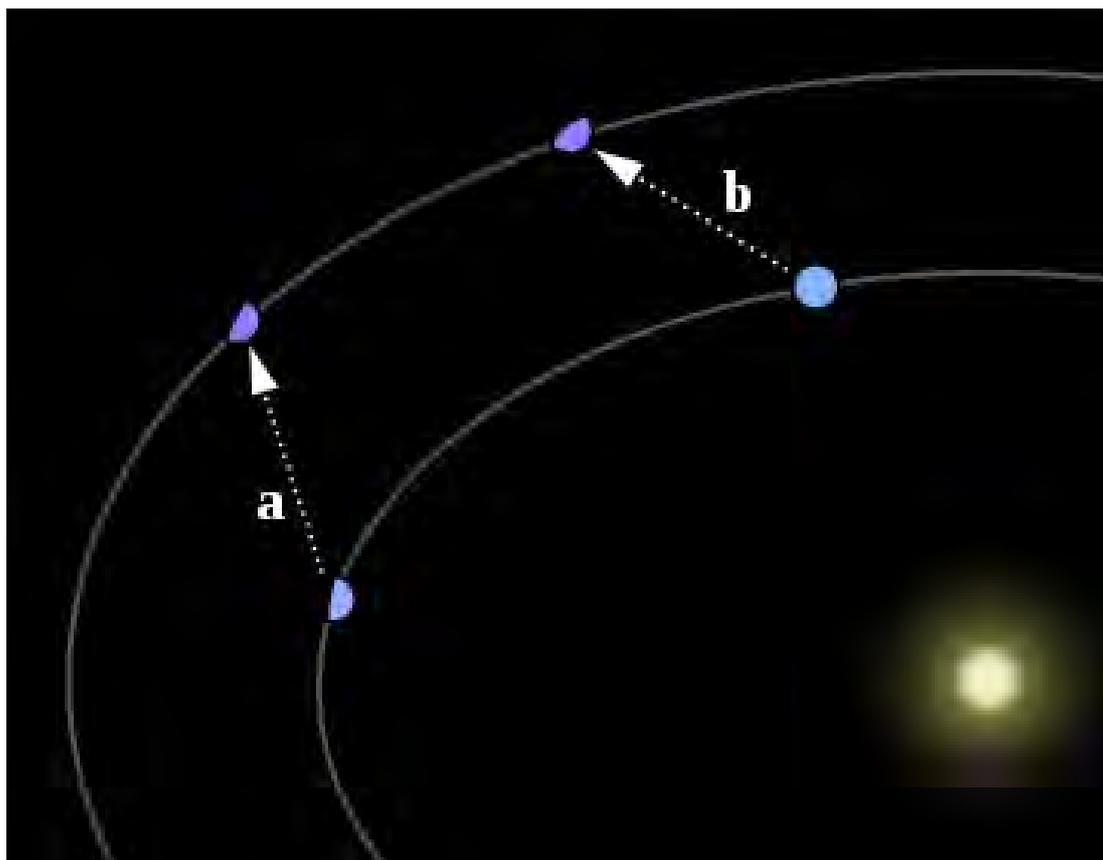


L'une des premières photographies de la galaxie d'Andromède (Isaac Roberts, 1899)

A) Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1877)

Urbain Jean Joseph Le Verrier, né à Saint-Lô le 11 mars 1811, mort à Paris le 23 septembre 1877, est un astronome et mathématicien français spécialisé en mécanique céleste, découvreur de la planète Neptune et fondateur de la météorologie moderne française.

Il est né dans une famille bourgeoise modeste. Après huit ans d'études au collège communal de sa ville natale Saint-Lô, il entre au Collège Royal de Caen où il étudiera les mathématiques de 1827 à 1830. Son père qui croit en son avenir dans les sciences l'inscrit à l'Institution Mayer dirigée par le mathématicien Choquet et vend sa maison pour subvenir aux frais de cette école préparatoire. Il poursuit ses études au Collège Louis-le-Grand à Paris et est admis en 1831 à l'École polytechnique dont il sort deux ans après comme ingénieur dans l'administration des tabacs. Il en démissionne en 1835 pour se consacrer à une carrière scientifique. Il travaille d'abord au laboratoire de chimie de Gay-Lussac et devient répétiteur en mathématiques et enseignant au collège Stanislas. Il demande en 1837 la place de répétiteur de chimie à l'École polytechnique mais celle-ci lui est ravie par Henri Victor Regnault. On lui offre en revanche une place de répétiteur de « géodésie, astronomie et machines », qu'il accepte et où il se spécialise en astronomie de position et en mécanique céleste. La même année, il épouse Lucile Marie Clotilde Choquet (fille de son ancien professeur), avec qui il aura trois enfants. En 1839, il présente à l'Académie des sciences son premier mémoire sur les variations séculaires des orbites des planètes (notamment d'Uranus, Alexis Bouvard ne parvenant pas à résoudre le problème des anomalies de cette planète). C'est d'ailleurs dans ce mémoire qu'on trouve la première description de l'algorithme de Faddeev-Leverrier. Urbain Le Verrier devient membre de la section d'astronomie de l'Académie des sciences le 19 janvier 1846 et le 14 octobre de la même année membre-adjoint du Bureau des longitudes.



En position (a), la planète extérieure (Neptune) est « en avant » par rapport à la planète intérieure (Uranus), ce qui « tire en avant » et donc accélère la planète intérieure : cette dernière sera donc un peu en avance sur son mouvement non perturbé (par symétrie, la planète extérieure, que l'on cherche, est pour sa part « tirée en arrière » de façon symétrique). À l'inverse, en (b), la planète extérieure a été « doublée » par la planète intérieure, et la première se retrouve donc « en arrière » de la seconde. Cette dernière est alors « tirée en arrière » et freinée, et est donc « en retard » sur son mouvement non perturbé. C'est l'avance et le retard d'Uranus sur sa position non perturbée qui a permis de découvrir Neptune.

Histoire de la découverte de Neptune - Premières observations

Neptune est invisible à l'œil nu car sa magnitude apparente ne dépasse jamais 7,7. Les premières observations de Neptune ne sont donc possibles qu'après l'invention du télescope. Neptune a été vue par Galilée en 1613, Jérôme Lalande en 1795 et John Herschel en 1820, mais aucun n'a officiellement reconnu la planète à l'époque. Ces observations ont été très importantes plus tard pour déterminer avec précision l'orbite de Neptune. Neptune semble bien en évidence, même dans les premiers télescopes, ce qui apporte de la crédibilité aux premières observations. Les dessins de Galilée montrent qu'il a observé Neptune le 28 décembre 1612 et à nouveau le 27 janvier 1613. Lors des deux observations, Galilée croit que Neptune est une étoile fixe. Au moment de sa première observation, Neptune était immobile dans le ciel parce qu'elle commençait à ce moment son mouvement rétrograde. Son mouvement a alors été jugé trop léger et sa taille apparente trop petite, pour être considérée comme une planète dans le petit télescope de Galilée. Cependant, en juillet 2009, le physicien David Jamieson de l'université de Melbourne a annoncé que Galilée était probablement conscient qu'il avait découvert quelque chose d'inhabituel à propos de cette « étoile ». Dans un de ses carnets, Galilée a noté le mouvement d'une étoile en arrière-plan (Neptune) le 28 janvier et un point (position de Neptune) que le physicien a trouvé sur un croquis antérieur, tiré de la nuit du 6 janvier, établi dans une encre différente suggérant une recherche systématique parmi ses observations précédentes. John Herschel a découvert Neptune en 1830 par hasard tout comme son père William Herschel a découvert Uranus en 1781. Dans une lettre de 1846 adressée à Friedrich Georg Wilhelm von Struve, Herschel note qu'il a observé Neptune lors d'un balayage du ciel le 14 juillet 1830. Même si son télescope était assez puissant pour apercevoir Neptune en un petit disque bleu, permettant ainsi de la distinguer d'une étoile, Herschel ne la reconnaît pas à l'époque et pense que c'est une étoile.

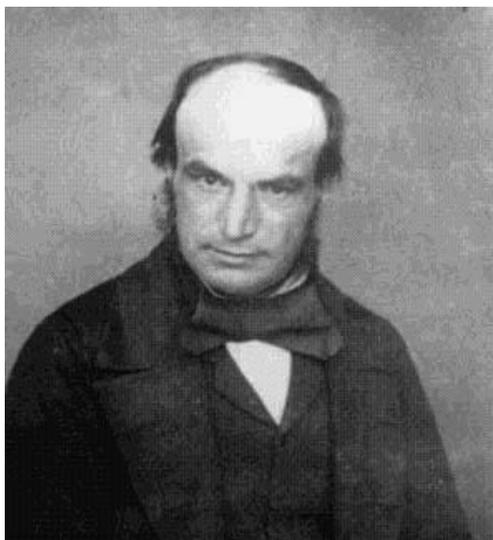
Irrégularités dans l'orbite d'Uranus

En 1781, Anders Johan Lexell est le premier à remarquer des irrégularités en calculant l'orbite d'Uranus. Il suggère qu'il pourrait y avoir d'autres planètes dans le Système solaire qui perturbent l'orbite de cette planète, considérant que le Système solaire s'étend aussi loin que 100 unités astronomiques. En 1821, Alexis Bouvard publie des tables astronomiques de l'orbite d'Uranus, faisant des prédictions de positions futures basées sur les lois du mouvement de Newton et sur la gravitation. Des observations ultérieures révèlent des écarts importants dans les tables, amenant Bouvard à émettre l'hypothèse de certains corps perturbants. Ces irrégularités, ou « résidus », à la fois dans la longitude écliptique et à la distance au Soleil de la planète, pourraient s'expliquer par un certain nombre d'hypothèses. L'effet de la gravité du Soleil, à une si grande distance, pourrait différer de la description de Newton. Les écarts pourraient également tout simplement être des erreurs d'observation. Finalement, Uranus pouvait être perturbée par une huitième planète encore inconnue. L'idée de l'existence d'une planète qui troublerait le mouvement d'Uranus était donc dans l'air bien avant l'intervention d'Adams et de Le Verrier, et il ne faut donc pas s'étonner que plusieurs astronomes aient essayé comme lui de prédire sa position par le calcul. D'ailleurs, dès avant 1840, Friedrich Wilhelm Bessel, qui avait insisté sur l'existence possible de « masses troublantes », avait chargé son élève Friedrich Wilhelm Flemming (1812-1840) de rassembler et de réduire les observations d'Uranus pour les comparer aux tables. Sans résultat, probablement à cause de la longue maladie du premier et la disparition prématurée du second.

John Couch Adams apprend les irrégularités de l'orbite d'Uranus alors qu'il est étudiant. Il est alors convaincu que l'hypothèse de la « perturbation » est bonne. Adams décide alors de calculer la masse, la position et l'orbite du corps perturbant en utilisant rien de plus que la loi de la gravitation universelle de Newton. En termes modernes, le problème est un problème inverse, c'est à dire une tentative de déduire les paramètres d'un modèle mathématique à partir des données observées. Bien que le problème soit simple pour les outils des mathématiques, à l'époque, il demande beaucoup de calculs laborieux à la main. Adams commence par supposer une position pour le corps hypothétique en utilisant la loi de Bode. Il calcule ensuite la trajectoire d'Uranus en utilisant la position supposée du corps troublant et calcule également la différence entre sa trajectoire calculée et les observations (en termes modernes, les résidus). Il ajuste ensuite les caractéristiques du corps troublant de la façon suggérée pour les résidus et répète le processus, par une approche similaire à celle de la régression. Le 13 février 1844, James Challis, directeur de l'Observatoire de Cambridge, demande, pour Adams, des données sur la position d'Uranus à l'astronome royal George Biddell Airy de l'Observatoire royal de Greenwich. Par la suite, Adams fait des retouches au moins jusqu'au 18 septembre 1845.

François Arago, qui est responsable de l'Observatoire de Paris, souhaite évidemment que le problème d'Uranus y soit traité. Arago ne voit personne à l'Observatoire qui soit capable d'aborder un problème aussi difficile. Au cours de l'été 1845, il demande à un jeune astronome extérieur à l'Observatoire, Urbain J.J. Le Verrier, de s'y attaquer. Peu après, le 10 novembre 1845, Le Verrier présente un mémoire sur Uranus à l'Académie des sciences de Paris, montrant que la théorie préexistante ne tenait pas compte de son mouvement. Au courant des travaux d'Adams, il tente une enquête similaire et calcule la position du corps perturbateur proposé. Il présente ses résultats le 1^{er} juin 1846 dans un second mémoire présenté à une réunion publique de l'Académie.

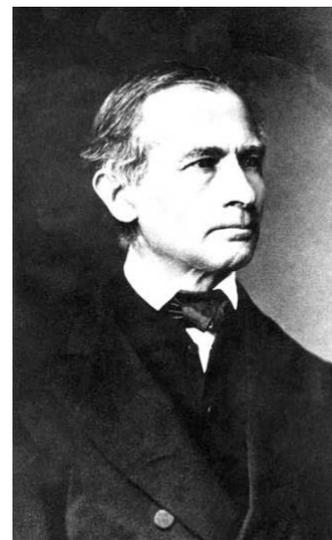
Course à la découverte



John Couch Adams



Urbain Jean-Joseph Le Verrier



Johann Gottfried Galle

Après avoir reçu en Angleterre les nouvelles de la prédiction de juin de Le Verrier, George Airy a immédiatement reconnu la similitude des solutions de Le Verrier et Adams. Jusqu'à ce moment, le travail d'Adams avait été un peu plus qu'une curiosité, mais une confirmation indépendante de Le Verrier stimulait Airy d'organiser une tentative secrète de trouver la planète. En juillet 1846, lors d'une réunion du Conseil des visiteurs de l'observatoire de Greenwich, avec Challis et Sir John Herschel présents, Airy suggère que Challis cherche la planète d'urgence avec le télescope à monture équatoriale de 11,25 pouces de Cambridge. La recherche débute le 29 juillet. Adams continue à travailler sur le problème, en fournissant à l'équipe britannique six solutions en 1845 et 1846 qui amènent Challis à chercher dans la mauvaise partie du ciel. Ce n'est qu'après que la découverte de Neptune ait été annoncé à Paris et à Berlin qu'il devenu évident que Neptune avait été observée à Cambridge le 8 août et le 12 août. Cependant, puisque Challis n'avait pas une carte d'étoiles à jour, elle n'a pas été reconnue comme une planète. Le 31 août, Le Verrier présente un troisième mémoire à l'Académie des sciences, donnant maintenant la masse et l'orbite du nouveau corps. Peu après, il écrit à plusieurs astronomes étrangers qu'il sait disposer d'instruments puissants et surtout de bonnes cartes du Ciel qui n'existent pas non plus à l'Observatoire de Paris. D'ailleurs, malgré les efforts d'Arago, on ne découvrira pas la planète à Paris.

Johann Gottfried Galle de l'Observatoire de Berlin reçoit la lettre de Le Verrier le 23 septembre et se met immédiatement au travail en observant le soir même la région suggérée par Le Verrier avec son télescope de 23 centimètres. L'étudiant de Galle, Heinrich Louis d'Arrest, suggère qu'une carte du ciel récemment dessinée de l'emplacement du ciel suggéré par Le Verrier pourrait être comparée avec les nouvelles observations afin de chercher la caractéristique de déplacement d'une planète par opposition à une étoile fixe. Galle passe au peigne fin toutes les étoiles de la région, pendant que Louis d'Arrest vérifie si l'astre observé est répertorié sur des cartes stellaires récentes. Neptune est découverte peu après minuit, après moins d'une heure de recherche et à moins de 1 degré de la position que Le Verrier avait prédite. Il attend quelques heures pour vérifier si l'astre a bien bougé, avant de confirmer qu'il s'agit bien de la planète recherchée. Après deux nuits supplémentaires d'observations dans lesquelles sa position et son mouvement sont vérifiés, Galle répond à Le Verrier : « la planète dont le lieu que vous avez [calculé] *existe vraiment* »

(mis en évidence dans l'original). Outre-Manche, la déception est grande. Challis apprend la découverte en lisant le *Times*. En revoyant ses notes, il découvre même qu'il a observé Neptune deux fois depuis le 1^{er} août. Une vive polémique s'ensuit jusque dans la presse. Les Britanniques ressortent les papiers d'Adams s'écriant que la découverte leur revient. À l'annonce de la découverte, Herschel, Challis et Richard Sheepshanks, ministre des affaires étrangères à la *Royal Astronomical Society*, annoncent qu'Adams avait déjà calculé la position et les caractéristiques de la planète. De leur côté, les Français réfutent en rappelant que seule une publication officielle peut valider la découverte, et refusent de pied ferme que le nom d'Adams figure à côté de celui de Le Verrier dans les livres d'histoire. En juin 1847, Adams et Le Verrier se sont rencontrés pour la première fois à la British Association for the Advancement of Science et ont entretenu par la suite une relation amicale. Airy a publié plus tard un compte-rendu de la situation, mais cache dans ce dernier que les calculs d'Adams étaient incomplets. Lors de nouveaux calculs sur les caractéristiques orbitales de Neptune, on s'aperçut que ceux de Le Verrier et Adams étaient faux, bien que tous deux aient annoncé la position de la planète non loin de sa position réelle. Le premier avait déterminé un rayon de 36,154 ua et une excentricité de 0,107 tandis que le second avait trouvé un rayon de 37,25 ua. Le rayon réel de l'orbite de Neptune est 30,1 ua et son excentricité inférieure à 0,009. Par ailleurs, des historiens ont trouvé des éléments qui tendent à montrer que les solutions d'Adams ne convergeaient pas mais variaient par plus de 35 degrés de longitude.

Paternité de la découverte

Une vive controverse s'est développée en France et en Angleterre à propos des mérites accordés aux deux astronomes. Airy a été fortement critiqué en Angleterre, particulièrement par le mathématicien James Whitbread, pour ne pas avoir, avec Challis, joué correctement leur rôle de mentors et d'avoir soutenu le talent d'Adams, jeune homme timide et réticent à publier des résultats pouvant ruiner sa carrière. Airy a défendu son comportement, en affirmant que la recherche d'une planète n'était pas le rôle de l'Observatoire royal de Greenwich. Dans l'ensemble, Airy a été défendu par ses biographes. Adams affirme cependant n'avoir ressenti aucune déception envers Challis et Airy. Il reconnaît avoir échoué lui-même à convaincre ses pairs de la valeur de ses travaux : « Je ne pouvais pas espérer que les astronomes d'expérience, qui étaient déjà occupés par d'importants travaux, pourraient avoir autant confiance en mes résultats que moi-même ». En France, la défense d'un Anglais inconnu a été ressentie comme portant atteinte au crédit accordé aux réalisations d'Urbain Le Verrier. L'année de la découverte, la *Royal Society* décerne la médaille Copley au scientifique pour ses réalisations, sans mentionner Adams. Malgré cela, la réputation académique d'Adams était déjà assurée. Certains astronomes britanniques soulignent que les deux astronomes ont résolu indépendamment le problème d'Uranus et attribuent une importance égale à chacun. Cependant, Adams lui-même a reconnu publiquement que Le Verrier l'avait devancé (en n'oubliant pas de mentionner le rôle de Galle) dans un document qu'il a donné à la Société Royale d'astronomie en novembre 1846 : « Je souligne ces dates simplement pour montrer que mes résultats ont été obtenus de façon indépendante, et préalablement à la publication de ceux de M. Le Verrier, et non pas avec l'intention de nuire à ses justes revendications par rapport aux honneurs de la découverte, car il n'y a pas de doute que ses recherches ont été rendues publiques en premier et ont conduit à la découverte de la planète par le D^r Galle. Les faits énoncés ci-dessus n'enlèvent rien au crédit de M. Le Verrier ». Des critiques ont paru peu de temps après disant qu'Adams et Le Verrier avait été trop optimistes dans la précision des calculs qu'ils ont faits et qu'ils avaient surestimés la distance de la planète au Soleil. Cette critique a été analysée en détail par André Danjon en 1946, qui a illustré, à l'aide d'un diagramme, que les hypothèses des orbites calculées à la fois par Le Verrier et Adams sont très différentes de la vraie orbite de Neptune. La nouvelle planète, d'abord appelé « *Le Verrier* » par Arago, a reçu, après consensus, le nom neutre de Neptune. En 1999, d'anciens documents ont été retrouvés : ils montrent que les prédictions d'Adams variaient et manquaient de précision, s'étendant sur plus de 20°, ce qui renforce la primauté de Le Verrier.

Directeur de l'Observatoire de Paris

Le 30 janvier 1854, Le Verrier est nommé directeur de l'Observatoire de Paris, succédant à François Arago et prenant le contrepied de la politique de son prédécesseur. Il fait notamment démolir, pour y aménager ses appartements, l'amphithéâtre construit par ce dernier, et entreprend une réorganisation totale qu'il n'arrivera pas à mener à terme par manque de crédits : division fortement hiérarchisée du travail (les observateurs sont payés 15 centimes à l'étoile observée, surveillance des travailleurs), appliquant le modèle

anglais de la révolution industrielle au domaine de l'astronomie. Il y fera établir un catalogue de 306 étoiles fondamentales. Mais il s'y montre si colérique et odieux que, à la suite de plusieurs pétitions et de la démission d'une soixantaine d'astronomes de l'Observatoire de Paris, et malgré son appartenance politique, il est relevé de ses fonctions en 1870 par décret impérial. Il démissionne en même temps du conseil général de la Manche, puis du Bureau des Longitudes. Il mène par la suite une carrière de journaliste scientifique, puis reprend en 1873 le poste de directeur de l'Observatoire après la mort accidentelle de son successeur, Charles-Eugène Delaunay, et ce jusqu'à sa mort. Urbain Le Verrier décède au sein même de l'Observatoire le 23 septembre 1877.

Météorologue

En devenant directeur de l'Observatoire de Paris, il hérite également d'un petit service météorologique. La météorologie, encore peu développée, dépendait de l'Observatoire de Paris. Le 14 novembre 1854, une terrible tempête, survenant sans la moindre alerte lors de la guerre de Crimée, traverse l'Europe d'ouest en est, causant la perte de 41 navires dans la Mer Noire. Le Verrier et Emmanuel Liass, son directeur adjoint, entreprennent alors, à la demande de Napoléon III, de mettre en place un réseau d'observatoires météorologiques sur le territoire français, destiné avant tout aux marins afin de les prévenir de l'arrivée des tempêtes. Ce réseau regroupe 24 stations dont 13 reliées par télégraphe, puis s'étendra à 59 observatoires répartis sur l'ensemble de l'Europe en 1865 : dès 1863, la première prévision météorologique (prévision à 24 heures grâce à des cartes et bulletins météorologiques quotidiens) destinée au port de Hambourg est réalisée. C'est la naissance de la météorologie moderne. À la tête d'une commission qui porta son nom, il réforme l'enseignement de l'École polytechnique en introduisant plus de science appliquée.

Politicien

Parallèlement, il mène aussi une vie politique. Pendant les journées de Juin de 1848, alors qu'il sert dans la Garde Nationale, son engagement à droite est pris lorsqu'il réalise la menace de ce qu'il appelle le « péril rouge ». Le 13 mai 1849, il est élu député de la Manche sous l'étiquette des Amis de l'Ordre. Il soutient la politique de Louis-Napoléon Bonaparte et son coup d'État du 2 décembre 1851 : quelques semaines après, il est nommé sénateur (Second Empire). Inspecteur général de l'enseignement supérieur pour les sciences le 9 mars 1852, il prépare notamment la réforme de la « bifurcation des études ». En 1852, il est élu conseiller général du canton de Saint-Malo-de-la-Lande. Il restera élu de ce canton jusqu'en 1870 et présidera le conseil général de la Manche de 1858 à 1870. Bien que souffrant d'une maladie pénible et douloureuse, il consacre la fin de sa vie à l'achèvement de son travail sur le mouvement des planètes. Il proposa de revoir à la baisse la distance Terre-Soleil et la vitesse de la lumière. La *Royal Astronomical Society* lui décerna la médaille d'honneur en 1876 pour ses mémoires sur les planètes gazeuses Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

Hommages

- Son nom est inscrit sur la tour Eiffel;
- L'astéroïde (1997) *Leverrier* a été nommé en son honneur ainsi qu'un des lycées de sa ville natale et un amphithéâtre de l'université de Caen;
- Un anneau de Neptune porte son nom;
- un cratère lunaire porte le nom de Le Verrier.

B) Un événement : L'éruption solaire de 1859

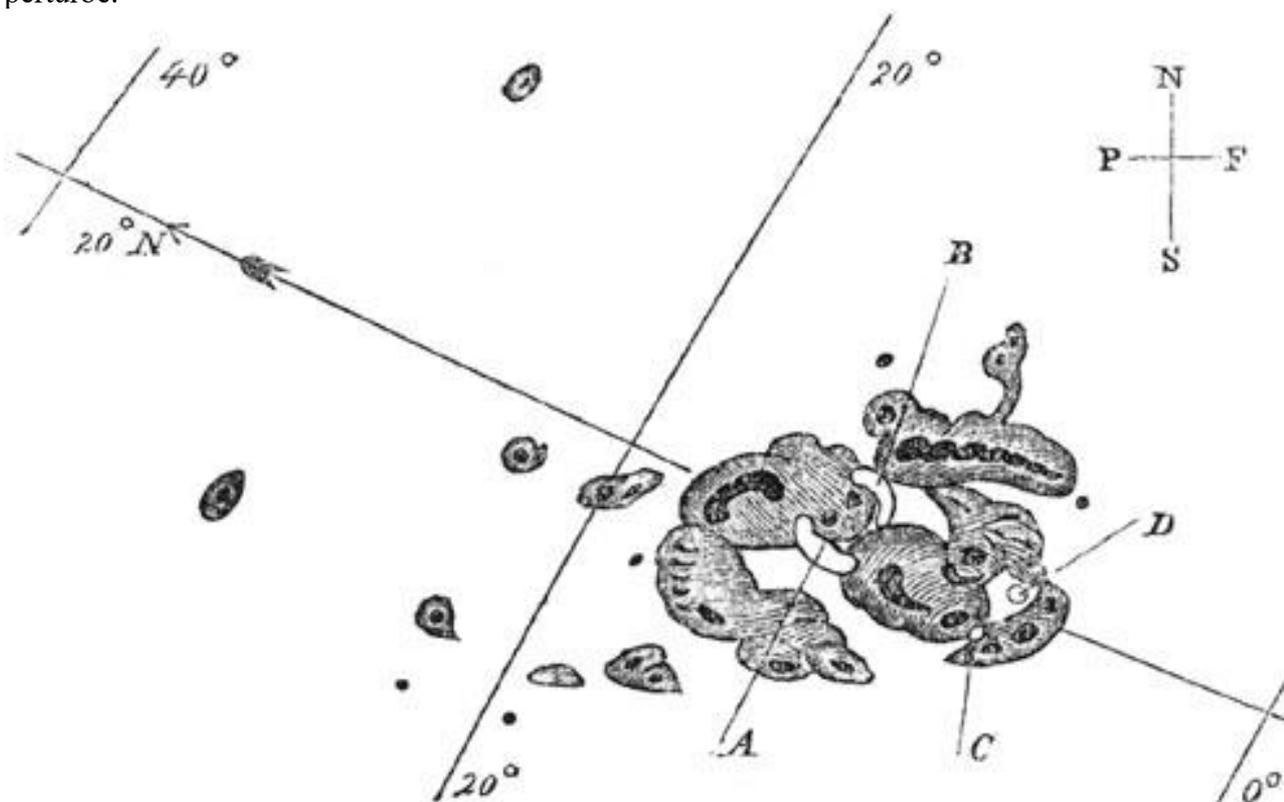
L'éruption solaire de 1859 est la plus violente éruption solaire jamais enregistrée. Elle affecte durablement les réseaux de télécommunication.

L'**éruption solaire de 1859** est une série d'éruptions solaires ayant eu lieu à la fin de l'été 1859 et ayant notablement affecté la Terre. Elle a notamment produit de très nombreuses aurores polaires visibles jusque dans certaines régions tropicales et a fortement perturbé les télécommunications par télégraphe électrique. Elle est considérée comme la plus violente tempête solaire enregistrée ayant frappé la Terre¹. Sur la base de certaines observations, ce type d'événement serait susceptible de se reproduire avec une telle violence seulement une fois tous les 150 ans. Cette éruption est utilisée comme modèle afin de prévoir les conséquences qu'une tempête solaire extrême serait susceptible de causer aux télécommunications à l'échelle mondiale, la stabilité de la distribution d'électricité et le bon fonctionnement des satellites

artificiels³. Une étude de 2004 estime que son niveau est supérieur à la classe X10. Une étude publiée en février 2012 évalue les chances de survenue d'un événement semblable à environ 12 % pour la décennie qui suit.

Déroulement de la tempête

La tempête se déroula en deux phases correspondant à deux éruptions solaires de grande ampleur. La première atteignit la Terre dans la soirée du 28 août 1859, selon l'*Eastern Standard Time*, soit le fuseau horaire de la côte est des États-Unis d'Amérique. Elle provoqua des aurores très lumineuses et spectaculaires, visibles jusque dans la mer des Caraïbes où de nombreux équipages de bateaux notèrent la couleur inhabituelle du ciel. De nombreux observateurs terrestres interprétèrent à tort les lumières aurorales comme étant dues à des incendies lointains. Le champ magnétique terrestre a été lui aussi fortement perturbé.



Croquis du groupe de taches solaires à l'origine de la seconde phase de l'éruption solaire, dessiné par Richard Carrington. Les quatre zones étiquetées de A à D correspondent aux lieux où apparurent les flashes aveuglants de l'éruption.

La seconde phase débuta le 1^{er} septembre. L'astronome anglais Richard Carrington, alors en train d'observer le Soleil, remarqua un ensemble de taches solaires anormalement grandes. Ces taches étaient apparues depuis plusieurs jours et étaient tellement grandes qu'elles étaient aisément visibles à l'œil nu. À 11 h 18, il nota un éclair très intense en provenance de ce groupe de taches, éclair qui dura moins de 10 minutes et correspondit au début d'une nouvelle éruption solaire extrêmement violente. L'éruption atteignit la Terre 17 heures plus tard (dans la nuit du 2 au 3 septembre), illuminant le ciel nocturne sur tout l'hémisphère nord. En effet, des témoignages révélèrent qu'il était possible de lire un journal en pleine nuit grâce à la lumière aurorale jusqu'à des latitudes aussi basses que Panama. Le champ magnétique terrestre apparent s'inversa temporairement sous l'influence du vent solaire issu de l'éruption dont le champ magnétique était, au moment où il atteignit la Terre, non seulement opposé au champ magnétique terrestre mais également plus intense. Le temps séparant la seconde éruption solaire de son arrivée sur Terre (seulement 17 heures) fut anormalement court, celui-ci étant normalement de l'ordre de 60 heures. Sa brièveté est une conséquence de la première éruption solaire, dont le vent avait déjà durablement nettoyé l'espace interplanétaire entre la Terre et le Soleil. La violence de cette seconde tempête comprima très fortement la magnétosphère terrestre, la faisant passer de 60 000 kilomètres à quelques milliers, voire quelques centaines de kilomètres. Cet amincissement de la magnétosphère rendit la Terre bien moins protégée des particules ionisées du vent solaire et est à l'origine des aurores très intenses et très étalées observées.

Conséquences

On estime que 5 % de l'ozone stratosphérique fut détruit lors de la tempête, ozone qui mit plusieurs années à se reformer dans la haute atmosphère. La température très intense de l'éruption (50 millions de degrés à sa naissance) permit d'accélérer les protons issus du Soleil à des énergies dépassant les 30 MeV, voire 1 GeV selon certains. De tels protons énergétiques furent en mesure d'interagir par interaction forte avec des atomes d'azote et d'oxygène de la haute atmosphère terrestre qui libérèrent des neutrons et furent également à l'origine de la formation de nitrates. Une partie de ces nitrates se précipita ensuite et atteignit la surface terrestre. Ils furent mis en évidence par des carottages glaciaires effectués au Groenland et en Antarctique révélant que leur abondance correspondait à celle ordinairement formée en 40 ans par le vent solaire. Les aurores générèrent ensuite des courants électriques dans le sol qui affectèrent les circuits électriques existants, notamment les réseaux de télégraphie électrique. De nombreux cas de télégraphistes victimes de violentes décharges électriques furent rapportés, ainsi que plusieurs incendies de station de télégraphie causés par les courants très intenses qui furent induits dans le sol.

Cela a failli arriver à nouveau en 2012 !

En 2012, une tempête solaire d'une puissance jamais vue depuis 1859 est passée tout près de la Terre, sans la frapper. C'est une chance : elle aurait pu perturber tous les circuits électriques de la planète et « renvoyer la civilisation contemporaine au XVIII^e siècle », selon un communiqué de la NASA diffusé le 23 juillet 2014. La tempête solaire évoquée par la NASA s'est produite le 23 juillet 2012. La NASA précise : « *Un nuage de plasma s'est échappé du soleil à la vitesse de 3 000 km/s, quatre fois supérieure à celle observée pour des éruptions solaires classiques. La tempête s'est dirigée vers l'orbite terrestre. Heureusement, la Terre n'était pas sur son passage [lorsqu'elle l'a traversée]* ». « *Si l'éruption avait eu lieu une semaine plus tôt, la Terre aurait été en première ligne* ».

VIII L'époque moderne

A) Le XX^e siècle

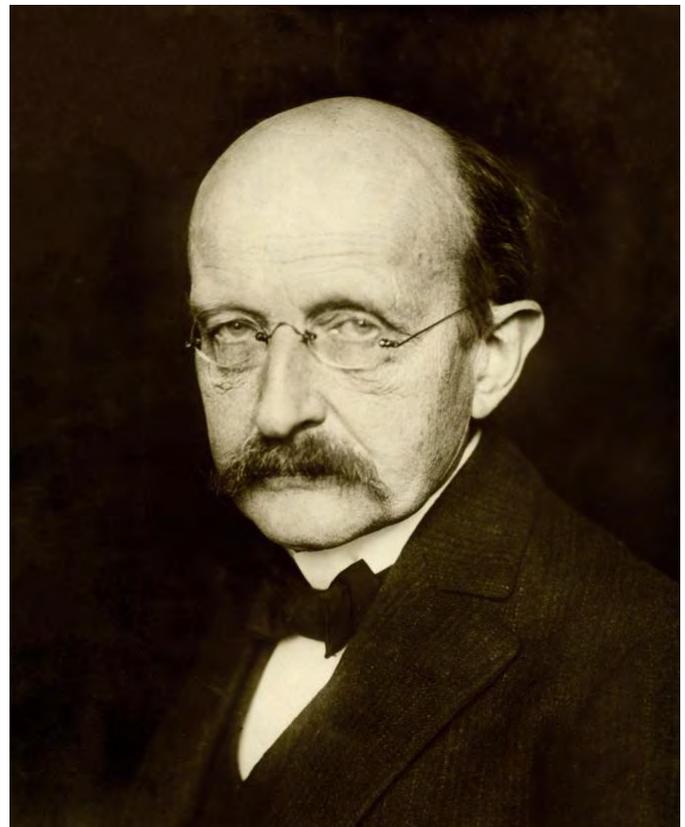
1) Max Planck (1858-1947)

Max Planck, né Max Karl Ernst Ludwig Planck le 23 avril 1858 à Kiel et mort le 4 octobre 1947 à Göttingen, en Allemagne est un physicien allemand. **Planck n'est pas un astronome mais sa théorie des quanta a tellement bouleversé les connaissances qu'on avait de la structure de la matière que cela impacte notre compréhension de la formation de l'Univers primordial, donc sa présence ici est indispensable.** Il est issu d'une famille nombreuse et bourgeoise. Ses arrière-grand-père et grand-père paternels sont professeurs de théologie, son père professeur de droit (il participa à la rédaction du code civil allemand), tandis que sa mère est issue d'une famille de pasteurs. Il est lauréat du prix Nobel de physique de 1918 pour ses travaux en théorie des quanta. Il a reçu la médaille Lorentz en 1927 et le prix Goethe en 1945. Max Planck fut l'un des fondateurs de la mécanique quantique. De ces travaux fut conceptualisé l'ère de Planck, période de l'histoire de l'Univers au cours de laquelle les quatre interactions fondamentales étaient unifiées.

Études et débuts



Max Planck en 1878



Max Planck en 1933

Max Planck fait ses études secondaires à Munich où son père enseigne. Il hésite alors entre se consacrer à la science ou à la musique. En 1874, il entame des études de mathématiques et de physique à l'université. Il obtient son baccalauréat à dix-sept ans et, trois ans plus tard, il conclut son cursus universitaire à Berlin. En 1878, il soutient sa thèse de doctorat sur « le second principe de la thermodynamique » et la notion d'entropie. Ses professeurs ne sont guère convaincus. Il passe néanmoins son habilitation en 1881 sur « les états d'équilibre des corps isotropes aux différentes températures », aboutissant aux mêmes résultats que ceux obtenus auparavant par l'Américain Josiah Willard Gibbs, dont les travaux étaient restés confidentiels. Jusqu'en 1885, il recherche un poste d'enseignant en physique théorique, discipline peu à la mode à l'époque. Il obtiendra enfin un poste de professeur adjoint à l'université de Kiel en 1885. Il est appelé à l'université Humboldt de Berlin comme professeur adjoint puis titulaire en 1892. Un poste qu'il gardera environ quarante ans.

Recherches

À Berlin, il poursuit des travaux en thermodynamique, en électromagnétisme et en physique statistique. Planck rejette, dans un premier temps, le modèle atomiste des gaz de Maxwell et Boltzmann. Pour lui, la théorie atomique s'effondrera à terme en faveur de l'hypothèse de la matière continue. Il se rallie devant l'évidence à l'atomisme à partir des années 1890. À cette même époque Lord Kelvin identifie le rayonnement du corps noir comme l'un des problèmes à résoudre. Travaillant à formuler avec exactitude le second principe de la thermodynamique, Planck s'intéresse dès 1894 au rayonnement électromagnétique du corps noir. Il adopte les méthodes statistiques de Boltzmann. En 1899, il introduit la constante de Planck (h) et la constante de Boltzmann (k) en même temps que la notion des quanta. En octobre 1900, il détermine la loi de répartition spectrale du rayonnement thermique du corps noir, sans en maîtriser l'interprétation physique. C'est à la fin de 1900 qu'il présente sa découverte à la société de physique de Berlin. C'est la naissance de la théorie des quanta, qu'il ne contribuera pas beaucoup à approfondir, laissant Albert Einstein l'étayer solidement. Planck a du mal à accepter sa propre hypothèse, rendant la matière « discontinue ». Il devint, par la suite, l'un des premiers soutiens d'Einstein, bien que ce dernier fût très critique vis-à-vis des théories de Planck avant de reconnaître ses positions novatrices. Avec Walther Nernst, Planck organise en novembre 1911 à Bruxelles le premier congrès Solvay qui réunit les sommités de la physique de cette époque. Vers la même époque, il s'oppose au positivisme logique d'Ernst Mach. Il prend sa retraite universitaire en 1927 mais continue à enseigner par la suite. Il reçoit, cette année-là, la médaille Lorentz, prix décerné par l'Académie royale des arts et des sciences néerlandaise.

Honneurs

Depuis 1894, il est membre de l'Académie royale des sciences et des lettres de Berlin dont il est nommé secrétaire perpétuel du comité de physique en 1912, impulsant une certaine dynamique à cette institution. Il y a fait notamment admettre Einstein. Après avoir été proposé à deux reprises, en 1907 et en 1908, il reçoit enfin le prix Nobel de physique de 1918 « en reconnaissance des services rendus à l'avancement de la physique par sa découverte des quanta d'énergie » (remis en 1919 pour cause de guerre). En 1913, il est nommé recteur de l'université de Berlin. En 1921, il est lauréat de la médaille Liebig puis en 1927 de la médaille Franklin pour sa notion de quantum d'énergie et de la médaille Copley en 1929. La « médaille Max-Planck » de physique est créée, elle lui sera conjointement attribuée avec Einstein en 1929. L'année suivante, à la mort de von Harnack, Planck est nommé président de la société KWG (*Kaiser Wilhelm Gesellschaft*, en l'honneur du kaiser Guillaume) qui deviendra après la Seconde Guerre mondiale la Société Max-Planck (*Max-Planck-Gesellschaft*), l'une des grandes institutions de la recherche allemande. Dans le même temps, il rédige des traités de physique théorique et travaille sur des ouvrages de vulgarisation réputés pour leur accessibilité. Il s'intéresse beaucoup à la pédagogie. Il a été le directeur de thèse de deux lauréats du prix Nobel, Max von Laue en 1903 et Walther Bothe en 1914, mais également du philosophe Moritz Schlick (1904). Max Planck meurt le 4 octobre 1947 à Göttingen. Planck est reconnu par les plus grands scientifiques, même avant sa mort. Einstein dit de lui qu'il est « un homme à qui il a été donné de doter le monde d'une grande idée créatrice ». Louis de Broglie affirme : « L'œuvre qu'il a accomplie est de celles qui assurent à leur auteur une gloire immortelle et, si quelque cataclysme ne vient pas anéantir notre civilisation, les physiciens des siècles à venir parleront toujours de la constante de Planck et ne cesseront de répéter avec admiration le nom de celui qui a révélé aux hommes l'existence des quanta ».

Vie privée

Il se marie avec Marie Merck (1861-1909) en 1887 et devient père de famille dès 1888. Ils s'installent alors à Grunewald, dans la banlieue de Berlin. Il aura au total quatre enfants, tous morts avant lui. Trois moururent lors de la Première Guerre mondiale : son fils aîné, Karl, devant Verdun en 1916 et ses deux jumelles en 1917 et 1919, de suites de couches. Erwin, son cadet, est fait prisonnier en France. Ce dernier est resté très proche de son père durant l'entre-deux-guerres, occupant des fonctions administratives importantes dans la République de Weimar. Il est arrêté en 1944, accusé de tentative d'assassinat sur Hitler dans le cadre du complot du 20 juillet 1944. Erwin est exécuté en février 1945. Sa première femme meurt en 1909 et il se remarie avec Marga von Hößlin (1882-1948). Planck a toujours conservé de sa jeunesse un attrait marqué pour la musique : il a ainsi composé quelques pièces et maîtrise le piano avec lequel il joue parfois avec le violoniste Joseph Joachim, ou plus tard avec Albert Einstein.

Défenseur d'une certaine tradition ou progressiste ?

Planck a toujours été respectueux de la hiérarchie mais n'hésite pas à défendre ses convictions contre les opinions du moment. Il a témoigné à plusieurs reprises de son patriotisme et de son soutien à la monarchie avant et pendant la Première Guerre mondiale. Il défend l'universitaire Léo Arons en 1895 qui appartient à un parti d'opposition, et ce contre l'avis du ministre du Culte et de l'Éducation de l'époque. De même, il favorise l'accès à l'enseignement supérieur aux femmes, dont Lise Meitner.

En 1914, il signe le « Manifeste des 93 », proclamant sa solidarité avec l'armée allemande. Il réitère à plusieurs reprises des discours patriotiques mais modère dès 1915 son attitude en refusant le boycott des publications britanniques préconisé par Vienne. Il pense alors à l'après-guerre en évoquant la situation désastreuse de la science allemande en cas de défaite et lutte contre toutes les tentatives d'isolationnisme en faisant preuve de modération. Dans l'entre-deux-guerres, il participe activement à la reconstruction de la vie intellectuelle allemande en réussissant à obtenir d'importantes subventions de l'État ou de fondations privées. Politiquement, il reste plutôt conservateur, défendant le pouvoir en place et étant défavorable au suffrage universel. Il refuse toutefois, à plusieurs reprises, de s'exprimer à propos de sujets en dehors de la sphère scientifique. Il plaide fortement en faveur de la recherche fondamentale, s'opposant en cela à Stark dont l'influence grandit avec celle des nazis.

La montée de l'antisémitisme commence à atteindre plusieurs grands savants dont le plus célèbre reste Einstein. En 1933, Hitler devient chancelier du Reich. Planck occupe alors des postes clés dans plusieurs institutions, dont l'institut *Kaiser-Wilhelm*, société savante possédant un certain pouvoir financier. Il pense alors pouvoir modérer la politique du Führer par un certain degré de pragmatisme. Il ne s'oppose donc pas directement au pouvoir en place et prône la discrétion, plusieurs de ses interventions publiques sont imprégnées de modération. En mars 1933, Einstein, en voyage aux États-Unis, annonce qu'il ne retournera pas en Allemagne pour des raisons politiques. Planck manifeste en privé son désaccord avec cette décision, estimant que ses effets risquaient d'être délétères pour les scientifiques juifs encore sur place. Il rencontre en mai 1933 Adolf Hitler pour essayer de défendre ses collègues israélites dans l'intérêt de l'Allemagne, sans succès. Ses discours ultérieurs restent dans la ligne choisie, mêlant une certaine ambiguïté dans l'opposition : il fait ainsi plusieurs éloges de la relativité sans en citer pourtant l'auteur. Les résultats sont néanmoins positifs dans les premières années : il fait échouer la nomination de Stark à la tête d'un institut important, parvient à obtenir des fonds pour la recherche et à conserver des membres juifs. Sous la pression, la société savante sous la direction de Planck doit cependant s'aligner progressivement sur le pouvoir, le savant étant obligé de discourir en l'honneur du Führer et de faire le salut nazi. Planck finit par abandonner toute fonction officielle en 1938. Il continue cependant de donner des conférences sur des thèmes sensibles comme *Science et religion* où il avoue croire en Dieu, mais pas en celui des chrétiens. Sa maison, à Grunewald, est détruite par un bombardement aérien le 15 février 1944 alors qu'il résidait à Rogätz, près de Magdebourg. À plus de 80 ans, il est obligé de fuir les bombardements alliés. À la libération, il se réfugie à Göttingen avec sa femme et sa nièce. À la demande des survivants, il devient un temps le président de l'institut *Kaiser-Wilhelm*, transformé en *Institut Max Planck* le 11 novembre 1946.

Découvertes

En 1900, Max Planck découvre la loi spectrale du rayonnement d'un corps noir (publiée en 1901) en essayant de réconcilier la loi de Rayleigh-Jeans qui fonctionne aux grandes longueurs d'ondes (basses fréquences) et la loi de Wien qui fonctionne aux petites longueurs d'ondes (hautes fréquences). Il estime que sa propre fonction correspondait remarquablement bien aux données pour toutes les longueurs d'ondes. La correction de la loi de Rayleigh-Jeans est particulièrement importante, car elle est construite sur une base théorique forte : la thermodynamique telle qu'elle était connue à l'époque ; mais souffre d'un défaut majeur aux longueurs d'ondes courtes : la catastrophe ultraviolette. Ce point suggère que la thermodynamique est fautive. Planck essaye donc de produire une nouvelle théorie fondamentale destinée à remplacer la thermodynamique. La loi de Rayleigh-Jeans et la loi de Planck utilisent le théorème d'équipartition et font correspondre un oscillateur à chaque fréquence. Rayleigh suppose que tous les oscillateurs sont également excités, sa loi prédit que les oscillateurs de très courtes longueurs d'ondes sont fortement excités même à température ambiante. Planck déduit sa loi de façon empirique. Il la justifie en postulant que l'énergie émise ou absorbée par les oscillateurs ne se fait que par petits paquets d'énergie E .

Ces paquets seraient directement reliés à la fréquence des oscillations selon la formule qu'il expose le 14 décembre 1900 :

$$E = h\nu$$

où : h est la constante de Planck;

ν est la fréquence du rayonnement électromagnétique.

Cette hypothèse permet de limiter l'excitation des oscillateurs aux courtes longueurs d'ondes, puisqu'ils ne peuvent absorber qu'une énergie au moins égale à $h\nu$. Bien qu'il soit facile maintenant d'interpréter cela en termes de quantification de la lumière en photons, Planck ne propose pas cette quantification. Cela apparaît clairement dans son article de 1901, dans les références qu'il y donne sur le travail qu'il a effectué sur le sujet, ainsi que dans ses *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung* (*Cours sur la théorie du rayonnement thermique*, éditées en 1906 à Leipzig) où il explique que sa constante concerne les oscillateurs. À l'époque, cette relation n'est considérée que comme un artifice de calcul mathématique. L'idée de quantification est développée par d'autres, notamment Einstein qui en étudiant l'effet photoélectrique propose un modèle et une équation dans lesquels la lumière est non seulement émise mais aussi absorbée par paquets ou photons. C'est l'introduction de la nature corpusculaire de la lumière. À la fin de sa vie il conclut : « Pour moi qui ai consacré toute ma vie à la science la plus rigoureuse, l'étude de la matière, voilà tout ce que je puis vous dire des résultats de mes recherches : il n'existe pas, à proprement parler, de matière ! Toute matière tire son origine et n'existe qu'en vertu d'une force qui fait vibrer les particules de l'atome et tient ce minuscule système solaire qu'est l'atome en un seul morceau [...] Nous devons supposer, derrière cette force, l'existence d'un Esprit conscient et intelligent. Cet Esprit est la matrice de toute matière ».

Œuvre écrite

Planck écrivit de nombreux articles scientifiques mais publia également plusieurs ouvrages et recueils de cours dont *Le Principe de la conservation de l'énergie* (1887), le *Précis de thermochimie* (1893), le *Cours sur la théorie du rayonnement thermique* (1906) et son *Cours de thermodynamique* (9 éditions entre 1897 et 1930). Vers la fin de sa vie, il fit de nombreuses conférences sur des thèmes plus philosophiques comme *Le Concept de causalité en physique* ou *Science et religion*. Il rédigea en 1945 une *Autobiographie scientifique*, court fascicule d'une trentaine de pages résumant son parcours.

2) Albert Einstein (1879-1955)

Albert Einstein né le 14 mars 1879 à Ulm, Wurtemberg, et mort le 18 avril 1955 à Princeton, New Jersey est un physicien théoricien qui fut successivement allemand, apatride (1896), suisse (1901) et sous la double nationalité helvético-américaine (1940). Tout comme Planck, Einstein n'est pas un astronome, mais ses théories (notamment celle de la relativité généralisée) ont une telle importance sur les mécanismes de l'Univers qu'il est **incontournable**. Il publie sa théorie de la relativité restreinte en 1905, et sa théorie de la gravitation dite relativité générale en 1915. Il contribue largement au développement de la mécanique quantique et de la cosmologie, et reçoit le prix Nobel de physique de 1921 pour son explication de l'effet photoélectrique. Son travail est notamment connu du grand public pour l'équation $E=mc^2$, qui établit une équivalence entre la matière et l'énergie d'un système. Il est aujourd'hui considéré comme l'un des plus grands scientifiques de l'histoire, et sa renommée dépasse largement le milieu scientifique. Il est « la personnalité du XX^e siècle » selon l'hebdomadaire *Time*.

Einstein présente un parcours scolaire relativement atypique par rapport aux éminents scientifiques qui furent plus tard ses contemporains. Très tôt, le jeune homme s'insurge du pouvoir arbitraire exercé par les enseignants, et est donc souvent dépeint comme un mauvais élément très étourdi par ces derniers. Il éprouve jusque tard dans son enfance des difficultés pour s'exprimer. Elles sont potentiellement dues à la dyslexie dont il souffrait enfant. Il commence sa scolarité au *Luitpold Gymnasium* de Munich et en est renvoyé à l'âge de 15 ans (son professeur de grec jugeant sa présence incompatible avec la stricte discipline y régnant à l'époque). Il a d'excellents résultats en mathématiques, mais refuse de s'instruire en biologie et en sciences humaines, car il ne perçoit pas l'intérêt d'apprendre des disciplines qu'il estime déjà largement explorées. Il considère alors la science comme le fruit de la raison humaine et de la réflexion. Il demande

à son père de lui donner la nationalité suisse, afin de rejoindre sa famille, émigrée à Pavie, en Italie. À 16 ans, il décide d'intégrer l'École polytechnique fédérale de Zurich (à laquelle on peut accéder sans avoir de bac). Il rate cependant l'examen d'entrée. Les examinateurs, ayant découvert son potentiel, l'incitent à se présenter une deuxième fois. Il entre alors à l'École Cantonale d'Aarau en Suisse, et y passe une année pour mieux se préparer au prochain examen. Il y trouve une atmosphère plus ouverte et favorable à son apprentissage, les étudiants étant davantage incités à penser par eux-mêmes qu'à réciter des leçons apprises. En 1896, il réussit l'examen, et intègre donc l'école, où il se lie d'amitié avec le mathématicien Marcel Grossmann, qui l'aidera plus tard en géométrie non euclidienne. Il y rencontre aussi Mileva Maric, sa première épouse. Il obtient de justesse son diplôme en 1900, s'avouant, dans son autobiographie, « incapable de suivre les cours, de prendre des notes et de les travailler de façon scolaire ». Au cours de cette période, il approfondit ses connaissances en autodidacte par la lecture de livres de référence comme ceux de Ludwig Boltzmann, de Helmholtz et de Walther Hermann Nernst. Son ami Michele Besso l'initie aux idées de la *Mécanique* d'Ernst Mach. Selon plusieurs biographies, cette période de 1900 à 1902 est marquée par la précarité de sa situation : il postule à de nombreux emplois sans être accepté. La misère d'Albert Einstein préoccupe son père, qui tente en vain de lui trouver un poste. Albert se résigne alors à s'éloigner du milieu universitaire pour trouver un emploi dans l'administration.

Carrière

En 1901, il publie son premier article scientifique dans les *Annalen der Physik*, et cet article est dédié à ses recherches sur la capillarité. À la fin de l'année 1902, naît le premier des enfants d'Albert Einstein, Lieserl. Son existence a longtemps été ignorée des historiens, et il n'existe aucune information connue sur son devenir. Albert et Mileva se marient en 1903, son père lui ayant finalement donné sa permission sur son lit de mort. En 1904, le couple donne naissance à Hans-Albert, puis en 1910 naît Eduard Einstein. En juin 1902, il est embauché à l'Office des Brevets de Berne, ce qui lui permet de vivre correctement tout en poursuivant ses travaux. Durant cette période, il fonde l'Académie Olympia avec Conrad Habicht et Maurice Solovine, qui traduira plus tard ses œuvres en français. Ce cercle de discussion se réunit à la maison d'Einstein, et organise des balades en montagne. Einstein partage le résultat de ses travaux avec Conrad Habicht et lui envoie les articles qu'il publie pendant l'année 1905 (souvent appelée son *annus mirabilis*) concernant les fondements de la relativité restreinte, l'hypothèse des quanta de lumière et la théorie du mouvement brownien, qui ouvrent de nouvelles voies dans la recherche en physique nucléaire, mécanique céleste, etc. L'article portant sur le mouvement brownien prend appui sur des travaux qu'Einstein développe plus tard, et qui aboutissent à sa thèse, intitulée *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen* (« Une nouvelle détermination des dimensions moléculaires », en allemand), et à son diplôme de doctorat le 15 janvier 1906.

En 1909, Albert Einstein est reconnu par ses pairs, en particulier Planck et Nernst, qui souhaitent l'inviter à l'université de Berlin. Le 9 juillet 1909, il est distingué docteur *honoris causa* par l'université de Genève. Les offres d'emplois se multiplient. En 1911, il est invité au premier Congrès Solvay, en Belgique, qui rassemble les scientifiques les plus connus. Il y rencontre entre autres Marie Curie, Max Planck et Paul Langevin. En 1913, Albert est nommé à l'Académie des sciences de Prusse. En 1914, il déménage en Allemagne et habite à Berlin de nombreuses années. Il devient membre de l'Académie royale des sciences et des lettres de Berlin. Les propositions d'emploi qu'il reçoit lui permettent de se consacrer tout entier à ses travaux de recherche. Mileva et Albert se séparent, et ce dernier commence à fréquenter une cousine berlinoise, Elsa. À l'ouverture du conflit de la Première Guerre mondiale, il déclare ses opinions pacifistes. La ville de Berlin s'était engagée à lui fournir une maison, mais Albert Einstein obtient finalement un terrain sur lequel il fait construire une maison à ses frais. Situé à Caputh, près du lac de Havelsee, l'endroit est calme et lui permet de faire fréquemment de la voile. En 1916, il publie un livre présentant sa théorie de la gravitation, connue aujourd'hui sous le nom de *relativité générale*. En 1919, Arthur Eddington réalise la mesure de la déviation que la lumière d'une étoile subit à proximité du Soleil, cette déviation étant une des prévisions découlant de cette théorie. Cet événement est médiatisé, et Einstein entreprend à partir de 1920 de nombreux voyages à travers le monde. En 1925, il est lauréat de la médaille Copley, et en 1928 il est nommé président de la Ligue des Droits de l'homme. Il participe en 1928 au premier cours universitaire de Davos, avec de nombreux autres intellectuels français et allemands. En 1935, il devient lauréat de la médaille Franklin. La situation s'assombrit en Allemagne dans les années 1920, et il subit des attaques visant ses origines juives et ses opinions pacifistes. Sa sécurité est menacée par la montée des mouvements

nationalistes, dont celle du parti nazi. Peu après l'arrivée d'Hitler au pouvoir, au début de 1933, il apprend que sa maison de Caputh a été pillée par les nazis, et il décide de ne plus revenir en Allemagne. Après un court séjour sur la côte belge, il s'installe aux États-Unis, où il travaille à l'Institute for Advanced Study de Princeton. Ses recherches visent à élaborer une théorie unifiant la gravitation et l'électromagnétisme, mais sans succès, ce qui le détourne peut-être d'autres recherches dans des domaines plus fructueux. Le 2 août 1939, sous la pression d'Eugene Wigner et de Leó Szilárd, physiciens venus d'Allemagne, il rédige une lettre à Roosevelt, qui contribue à enclencher le projet Manhattan. Son fils Eduard, atteint d'une possible schizophrénie, passe la majeure partie de sa vie dans une clinique en Suisse, et son autre fils Hans-Albert devient ingénieur en Californie.

Mort

Einstein meurt le 18 avril 1955 d'une rupture d'anévrisme. Une étude réalisée en 2013 sur son cerveau révèle tout au plus une hyperconnexion entre les deux hémisphères, ce qui est traditionnellement preuve d'une grande intelligence. Ses cendres sont éparpillées dans un lieu tenu secret, conformément à ses dernières volontés. Mais, en dépit de son testament, son cerveau et ses yeux ont été prélevés, le premier par le médecin légiste ayant effectué l'autopsie, les seconds par son ophtalmologiste.

Travail scientifique

Année 1905

L'année 1905 est une année exceptionnellement fructueuse pour Einstein (elle est souvent désignée par l'expression latine *annus mirabilis*), quatre de ses articles étant publiés dans la revue *Annalen der Physik* :

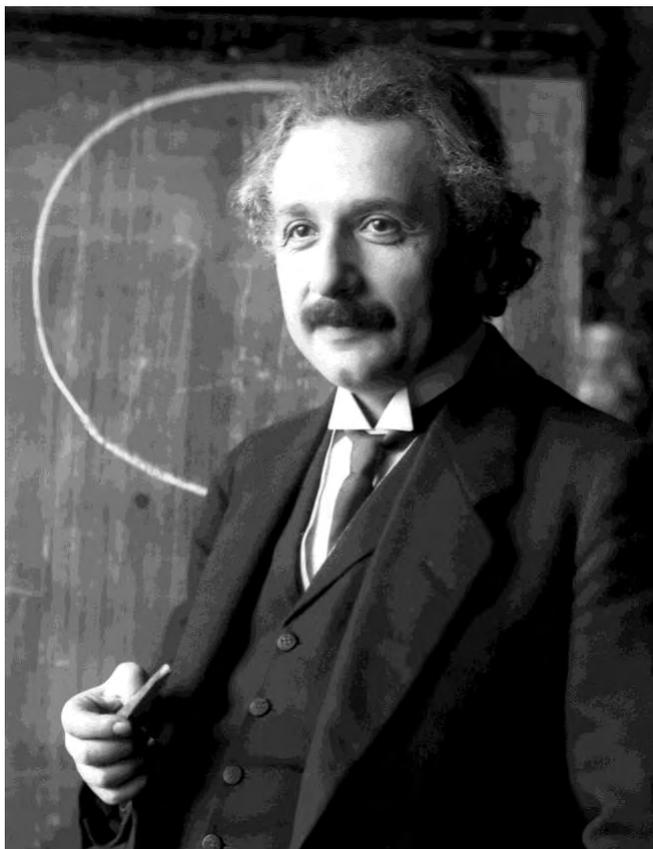
- le premier article, publié en mars, expose un point de vue révolutionnaire sur la nature corpusculaire de la lumière, par l'étude de l'effet photoélectrique. Einstein l'intitule : *Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière*. Il y relate ses recherches sur l'origine des émissions de particules, en se basant sur les travaux de Planck qui avait, en 1900, établi une formule d'un rayonnement quantifié, c'est-à-dire discontinu. Planck avait été contraint d'aborder le rayonnement lumineux émis par un corps chaud d'une manière qui le déconcertait : pour mettre en adéquation sa formule et les résultats expérimentaux, il lui avait fallu supposer que le courant de particules se divisait en blocs d'énergie, qu'il appela quanta. Bien qu'il pensât que ces quanta n'avaient pas de véritable existence, sa théorie semblait prometteuse et plusieurs physiciens y travaillèrent. Einstein réinvestit les résultats de Planck pour étudier l'effet photoélectrique, et il conclut en énonçant que la lumière se comportait à la fois comme une onde et un flux de particules. L'effet photoélectrique a donc fourni une confirmation simple de l'hypothèse des quanta de Max Planck. En 1920, les quanta furent appelés les photons.
- deux mois plus tard, en mai, Einstein fait publier un deuxième article sur le mouvement brownien. Il explique ce mouvement par une entorse complète au principe d'entropie tel qu'énoncé à la suite des travaux de Newton sur les forces mécaniques : selon lui, les molécules tireraient leur énergie cinétique de la chaleur. Cet article fournit une preuve théorique (vérifiée expérimentalement par Jean Perrin en 1912) de l'existence des atomes et des molécules. Le mouvement brownien a été expliqué au même moment que par Einstein par Marian Smoluchowski et quelques années avant par Louis Bachelier en 1900, avec des motivations liées aux mathématiques financières.
- le troisième article est encore plus important, car il représente la rupture intuitive d'Einstein avec la physique newtonienne. Dans celui *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement*, le physicien s'attaque au postulat d'un espace et d'un temps absolus, tels que définis par la mécanique de Newton, et à l'existence de l'éther, milieu interstellaire inerte qui devait soutenir la lumière comme l'eau ou l'air soutiennent les ondes sonores dans leurs déplacements. Cet article, publié en juin, amène à deux conclusions : l'éther n'existe pas, et le temps et l'espace sont relatifs. Le nouvel absolu qu'Einstein édifie est détaché de la valeur quantitative de ces deux notions que sont l'espace et le temps, qui restent cependant liées par la conservation à travers différents référentiels d'études de l'intervalle d'espace-temps entre événements, notion similaire à la distance entre points de l'espace. Les conséquences de cette vision révolutionnaire de la physique, qui découle de l'idée qu'Einstein avait de la manière dont les lois physiques devaient contraindre l'univers, ont bousculé tant la physique théorique que ses applications pratiques. L'apport exact d'Einstein par rapport à Henri Poincaré et quelques autres physiciens est aujourd'hui assez disputé (voir Controverse sur la paternité de la relativité).

- le dernier article, publié en septembre, donne au titre *L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie ?* une réponse célèbre : la formule d'équivalence masse-énergie, $E=mc^2$. C'est un résultat de la toute nouvelle relativité restreinte, dont découle un vaste champ d'études et d'applications : physique nucléaire, mécanique céleste, et armes et centrales nucléaires, par exemple.

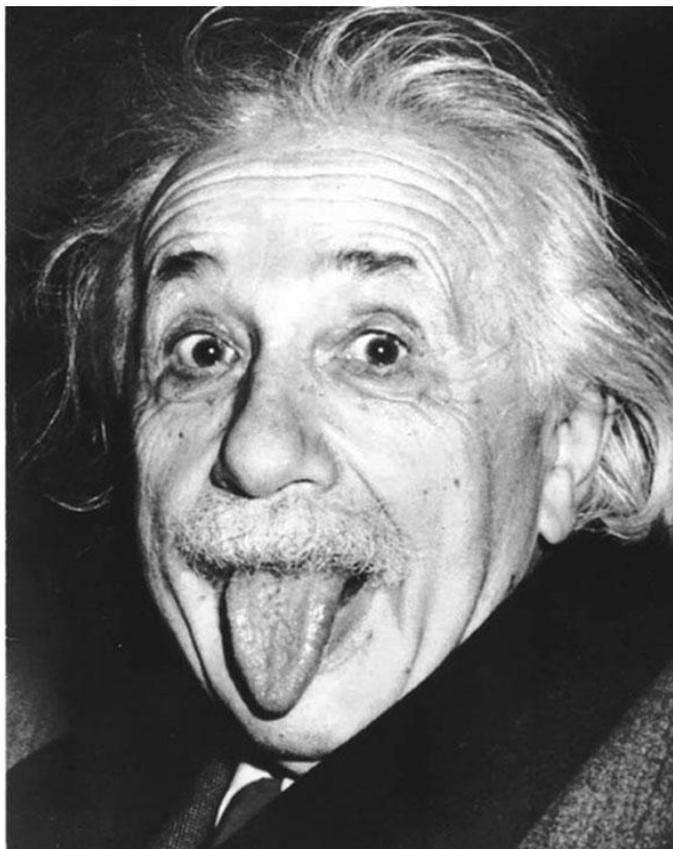
Années de reconnaissance (1910-1935)

Son ancien condisciple Marcel Grossmann l'aide dans ses travaux en lui apportant ses connaissances en géométrie différentielle : ils publient un article sur les tenseurs de Ricci et de Riemann-Christoffel en 1913. En octobre 1914, Einstein publie un article sur la géométrie différentielle, et en juin 1915, il donne des conférences à l'université Göttingen devant Hilbert et Klein. Le 25 novembre 1915, il soumet son manuscrit de la théorie de la relativité générale à la section de mathématique et de physique de l'Académie royale des sciences de Prusse, qui la publie le 2 décembre. Les « équations du champ » sont la clé de voûte de cette théorie. Elles décrivent le comportement du champ de gravitation (la métrique de l'espace-temps) en fonction du contenu énergétique et matériel. La théorie de la relativité ainsi que ses ouvrages de 1905 et 1916 forment la base de la physique moderne. La théorie de la relativité générale publiée, Einstein recommence à travailler sur la physique des quanta et introduit en 1917 la notion d'émission stimulée qui lui permet de retrouver la loi de Planck à partir d'hypothèses purement quantiques sur la façon dont les quanta de lumière (photons) sont absorbés et émis par les atomes. Idée fructueuse qui est à la base du développement du maser et du laser.

La même année, Einstein montre qu'il convient d'associer une quantité de mouvement au quantum de lumière; hypothèse qui sera validée par l'expérience en 1923 grâce aux travaux d'Arthur Compton sur la diffusion des rayons X. La relation d'Einstein avec la physique quantique alors naissante est remarquable : d'un côté, nombre de ses travaux sont à la base du développement de cette nouvelle physique, comme son explication de l'effet photoélectrique; d'un autre côté, il critiquera beaucoup d'idées et d'interprétations de la mécanique quantique, son non-déterminisme en particulier.



Albert Einstein en 1921



Albert Einstein en 1951

Le débat entre le groupe formé par Einstein et Erwin Schrödinger et celui de Niels Bohr et Werner Heisenberg se situait à la frontière de la physique et de la philosophie. En 1927, invité au cinquième congrès Solvay, il a de nombreuses conversations avec Niels Bohr à ce sujet. Il dit alors : « *Gott würfelt nicht* » (« Dieu ne joue pas aux dés ») pour marquer son opposition à l'interprétation probabiliste de la physique

quantique, ce à quoi Niels Bohr répondit : « Qui êtes-vous Albert Einstein pour dire à Dieu ce qu'il doit faire ? ». Le paradoxe EPR qu'il précise en 1935 avec Boris Podolsky et Nathan Rosen à Princeton reste aujourd'hui un exemple important d'une tentative pour questionner les fondements de la mécanique quantique.

Vérification par l'éclipse

Pour vérifier la relativité générale, une mesure de la déviation des rayons lumineux aux alentours d'une masse lors d'une éclipse solaire est envisagée. La première expédition est prévue en 1915, mais est rendue impossible par la Première Guerre mondiale. En 1919, Arthur Eddington réalise cette mesure et annonce que les résultats sont conformes à la théorie d'Einstein. Grâce à cette expérience, Einstein devient célèbre du jour au lendemain. Le fait qu'une théorie allemande ait été vérifiée par un Anglais un an après la Première Guerre mondiale, fait office de symbole en faveur de la paix. Il apparaît bien plus tard qu'en raison du temps nuageux, la marge d'erreur était bien supérieure au phénomène à mesurer. En 1980, les philosophes des sciences John Earman et Clark Glymour affirment qu'Eddington a biaisé la sélection des données qu'il a recueillies; leur propos est repris en 1993 par Harry Collins et Trevor Pinch. En revanche, l'expérience est validée par le physicien Daniel Kennefick. Celui-ci souligne que l'analyse nuancée d'Earman et Glymour a été instrumentalisée pour répandre l'idée selon laquelle la théorie de la relativité n'a obtenu de succès que par la grâce de la diplomatie (Eddington souhaitant mettre fin à la mise au ban des scientifiques allemands), voire pour répandre la défiance à l'égard des scientifiques. Le physicien Stephen Hawking commente en 1988 dans son ouvrage *Une brève histoire du temps* que ce genre de faux bon résultat est courant quand on sait à quoi s'attendre. Comme d'autres mesures avaient entre-temps confirmé la déviation de la lumière, la validité de la relativité générale n'en fut pas ébranlée.

Personnalité

Einstein et la politique

Les positions politiques prises par Einstein sont marquées par ses opinions socialistes et pacifistes, relativisant ces dernières parfois, par exemple en déconseillant l'objection de conscience à un jeune Européen lui ayant écrit pendant les années 1930, « pour la sauvegarde de son pays et de la civilisation ». En 1913, il est cosignataire d'une pétition pour la paix que trois autres savants allemands acceptent de signer. Einstein éprouve une forte antipathie vis-à-vis des institutions militaires, publiant dès 1934 : « La pire des institutions grégaires se prénomme l'armée. Je la hais. Si un homme peut éprouver quelque plaisir à défiler en rang aux sons d'une musique, je méprise cet homme... Il ne mérite pas un cerveau humain puisqu'une moelle épinière le satisfait. Nous devrions faire disparaître le plus rapidement possible ce cancer de la civilisation ». Einstein est lié à de nombreuses causes pacifistes, car il se montre ouvert aux propositions multiples de soutien qu'il reçoit, et accepte souvent de s'engager pour les causes qu'il juge justes. Einstein apporte un soutien marqué aux mouvements sionistes. En 1920, il accompagne ainsi le chef de file sioniste Chaim Weizmann aux États-Unis au cours d'une campagne de récolte de fonds. Il se rend également en Palestine mandataire dans le cadre de l'inauguration de l'université hébraïque de Jérusalem à laquelle il lègue plus tard ses archives personnelles. Ses apparitions donnent un prestige politique à la cause sioniste. À la suite d'une invitation à s'établir à Jérusalem, il écrit dans son carnet de voyage que « le cœur dit oui [...] mais la raison dit non ». Selon Tom Segev, Einstein apprécie son voyage en Palestine et les honneurs qui lui sont faits. Il marque néanmoins sa désapprobation en voyant des Juifs prier devant le mur des Lamentations; Einstein commente qu'il s'agit de personnes collées au passé et faisant abstraction du présent. Ben Gourion lui propose en 1952 la présidence de l'État d'Israël, qu'il refuse :

« D'abord, si je connais les lois de l'univers, je ne connais presque rien aux êtres humains. De plus, il semble qu'un président d'Israël doit parfois signer des choses qu'il désapprouve, et personne ne peut imaginer que je puisse faire cela ». Ce refus est dû au fait que sa santé soit déclinante, ainsi qu'à la vision qu'il a d'Israël, où il espérait voir une cohabitation entre Juifs et Arabes et non l'établissement d'une nation juive. Il a une vision clairvoyante de sa situation entre les deux guerres. Il écrit dans une remarque à la fin d'un article écrit pour le *Times* de Londres : « Je passe actuellement en Allemagne pour un savant allemand et en Angleterre pour un juif suisse. Supposons que le sort fasse de moi une bête noire, je deviendrai au contraire un juif suisse en Allemagne, et un savant allemand en Angleterre ». Il reçoit des menaces de mort dès 1922. De violentes attaques ont lieu contre sa théorie de la relativité en Allemagne et en Russie. Philipp Lenard, « chef de la physique aryenne ou allemande » attribue à Friedrich Hasenöhrle la formule $E=mc^2$ pour en faire une création aryenne. Einstein démissionne, juste à temps, de l'académie de Prusse en 1933,

et il est exclu de celle de Bavière. En mars 1933, en tant que président d'honneur de la Ligue contre l'antisémitisme, il lance un appel aux peuples civilisés de l'univers, tâchant « d'éveiller la conscience de tous les pays qui restent fidèles à l'humanisme et aux libertés politiques »; dans cet appel il s'élève contre « les actes de force brutale et d'oppression contre tous les gens d'esprit libre et contre les juifs, qui ont lieu en Allemagne ». Cette année-là, Einstein est en voyage à l'étranger, et il choisit de ne pas revenir en Allemagne, où Hitler a pris le pouvoir en janvier. Après un séjour en Belgique, il décline une proposition de la France de l'accueillir comme professeur au Collège de France, et part pour les États-Unis, à Princeton.

Le 2 août 1939, il signe une lettre, rédigée par les physiciens Léo Szilard et Eugène Wigner, destinée à Roosevelt, qui contribue à enclencher le projet Manhattan, ceci contrecarrant avec l'intention d'origine de la lettre qui ne se voulait que préventive des risques potentiels que les récentes découvertes scientifiques pourraient causer (celles-ci permettraient en effet la réalisation de « bombes d'un nouveau type et extrêmement puissantes »).



Einstein et Robert Oppenheimer, vers 1950

Après la guerre, Einstein milite pour un désarmement atomique mondial, jusqu'au seuil de sa mort en 1955, où il confesse à Linus Pauling : « *j'ai fait une grande erreur dans ma vie, quand j'ai signé cette lettre [de 1939]* ». Après la Seconde Guerre mondiale, son engagement vis-à-vis des communautés juives et Israël, est nuancé par ses opinions pacifistes. Il préface le *Livre noir*, recueil de témoignages sur l'extermination des juifs en Russie par les nazis pendant la guerre. Et en décembre 1948, il cosigne une lettre condamnant le massacre de Deir Yassin commis par des combattants israéliens de l'Irgoun et du Lehi pendant la guerre de Palestine de 1948. Pendant la guerre froide, il s'exprime contre la course aux armements et appelle, par exemple avec Bertrand Russell et Joseph Rotblat, les scientifiques à plus de responsabilités, les gouvernements à un renoncement commun à la prolifération des armes atomiques et à leur utilisation, et les peuples à chercher d'autres moyens d'obtenir la paix (création du Comité d'urgence des scientifiques atomistes en 1946, manifeste Russell-Einstein en 1954). Il s'est plusieurs fois exprimé sur sa conviction de la nécessité de créer un État mondial. Einstein s'est exprimé sur ses convictions socialistes en 1949, en pleine période du maccarthysme, dans un essai intitulé *Pourquoi le Socialisme*, publié dans la *Monthly Review*. Il lui semble que le principe du gouvernement des peuples par eux-mêmes, le fait de travailler pour eux-mêmes, est plus propice à l'épanouissement individuel que celui de l'exploitation du grand nombre par

une minorité. Mais il est déçu par ce qu'il peut apprendre de l'Union soviétique, et il considère que les peuples doivent s'engager d'abord dans le pacifisme, afin de mettre en place des conditions favorables à une évolution vers le socialisme. Sa correspondance révèle qu'il voit un rapprochement entre le maccarthysme et les événements des années 1930 en Allemagne. Il écrit au juge chargé de l'affaire Rosenberg pour demander leur grâce, et il aide de nombreuses personnes qui souhaitent immigrer aux États-Unis. Contacté par William Frauenglass, un professeur d'anglais de lycée suspecté de sympathies communistes, il rédige un texte dénonçant ouvertement le maccarthysme et encourageant les intellectuels à résister à ce qu'il qualifie de « mal ». Le FBI ouvre un dossier sur lui, disponible aujourd'hui sur leur site internet. Joseph McCarthy attaque Einstein au Congrès en le traitant d'« ennemi de l'Amérique ». Sa secrétaire, Helen Dukas, est soupçonnée d'espionnage au service de l'URSS. Les médias américains se montrent virulents dans leur traitement de l'affaire, et seules quelques personnalités, comme Bertrand Russell, prennent sa défense. L'affaire est classée en 1954, aucune preuve concluante n'ayant été apportée pour étayer ces accusations.

Einstein et la lutte contre les discriminations raciales

Après avoir fui l'Allemagne nazie, Einstein découvre, pendant son exil américain, l'ampleur de la discrimination raciale aux États-Unis. Vivant au milieu de la communauté noire de Princeton, il observe de près la ségrégation et s'investit au quotidien pour que les enfants noirs aient accès à la connaissance. Refusant d'intervenir dans les universités qui pratiquent la ségrégation raciale, Einstein accepte pourtant de donner une conférence à l'université Lincoln en 1946 où il déclare : « Je suis de passage dans cet établissement au nom d'une cause qui en vaut la peine. En effet, les gens de couleur continuent d'être séparés des Blancs aux États-Unis. Cette séparation ne résulte pas d'une maladie des gens de couleur mais d'une maladie des Blancs. Il est impensable que je me taise à ce sujet ». Il se lie d'amitié avec le chanteur noir Paul Robeson et devient, à ses côtés, un militant des droits civiques et de la lutte contre le racisme. Avec Robeson, Einstein milite aussi en faveur du soutien des États-Unis aux républicains espagnols qui combattent le franquisme; tous deux s'attirent rapidement les foudres et la haine du directeur du FBI, J. Edgar Hoover qui les considère comme des « ennemis d'État ». Alors qu'il est harcelé par le FBI pour ses positions politiques, l'intellectuel noir et fondateur de la NAACP (association pour la défense et la promotion des Noirs), W. E. B. Du Bois, sollicite le soutien d'Einstein pour sa défense devant la cour fédérale qui s'apprête à le condamner pour haute trahison. Einstein se porte aussitôt garant pour Du Bois, ce qui embarrasse les juges et empêche une condamnation arbitraire de ce dernier. Cet aspect de sa vie est resté largement méconnu et ignoré par la plupart de ses biographes.

Vie sociale

Bien qu'Einstein ait rencontré un grand nombre de personnalités majeures de son époque, dans les domaines scientifique, politique et artistique, laissant une correspondance très riche, il se décrivait lui-même comme un véritable solitaire « qui n'a jamais appartenu de tout cœur à l'État, au pays natal, au cercle des amis et pas même à la famille dans le sens étroit du terme, mais qui a toujours éprouvé à l'égard de toutes ces liaisons un sentiment jamais affaibli de leur être étranger ». Parmi ses relations célèbres, on compte une amitié avec la reine Élisabeth de Belgique, avec qui il joua du violon, Arnold Berliner dont il témoigne de l'affection lors de son 70^e anniversaire, George Bernard Shaw au sujet duquel il écrit « on trouve rarement des hommes assez indépendants pour s'apercevoir des faiblesses et des sottises de leurs contemporains, sans en être infectés eux-mêmes » ou Bertrand Russell. Modeste et pensant quant à lui que « Chacun doit être respecté dans sa personne et nul ne doit être idolâtré », il ironisait au sujet de sa célébrité et de ses effets : « Cela pourrait bien provenir du désir irréalisable pour beaucoup, de comprendre quelques idées que j'ai trouvées, dans une lutte sans relâche, avec mes faibles forces ». Sa première épouse, Mileva Maric est atteinte de coxalgie, qui la rend boiteuse. C'est aussi une jeune femme brillante, élève du *Polytechnicum*. Elle tombe enceinte alors qu'ils ne sont pas encore mariés, et elle accouche en janvier 1902 chez ses parents, en Serbie, d'une fille Lieserl (Elisabeth et dont on perd la trace. Einstein se montra très dur avec sa compagne suivante, Elsa (doublement sa cousine). Il voit peu son fils Hans-Albert (né en 1904) qui, à l'âge adulte, travaille en Californie. La santé mentale de son autre fils, Eduard né en 1910, se détériore brutalement alors qu'il est âgé de vingt ans, et il doit être interné une première fois en 1930 à la clinique psychiatrique universitaire de Zurich où les médecins lui diagnostiquent une schizophrénie. Son père lui rend une dernière visite en 1933. Eduard meurt dans cette clinique en 1965. D'abord critique envers la psychanalyse, il refuse que son fils Eduard suive un nouveau traitement psychanalytique, mais il finit par

accepter l'essentiel des idées de Freud. En 1933, il choisit Sigmund Freud pour publier un échange de lettres intitulé *Pourquoi la guerre ?*.

Einstein et la religion

Einstein écrit plusieurs textes traitant des relations entre science et religion. Dans son article paru en 1930, Einstein distingue trois formes de religion :

- la première est due à la crainte et à une incompréhension de la causalité des phénomènes naturels, d'où l'invention d'êtres surnaturels;
- la deuxième est sociale et morale;
- la troisième, qu'Einstein appelle « religiosité cosmique », est une contemplation de la structure de l'Univers. Elle est compatible avec la science et n'est associée à aucun dogme ni croyance. Einstein déclare être religieux, mais seulement dans ce troisième sens qu'il voit dans le mot religion.

Lorsque, en 1929, le rabbin Herbert S. Goldstein lui demande « Croyez-vous en Dieu ? », Einstein répond : « Je crois au Dieu de Spinoza qui se révèle lui-même dans l'ordre harmonieux de ce qui existe, et non en un Dieu qui se soucie du destin et des actions des êtres humains ». Einstein a souvent utilisé le mot Dieu, comme dans sa célèbre formule « Dieu est subtil, mais pas malicieux », cependant le sens qu'il donnait à ce mot fait l'objet de diverses interprétations. Une partie du clergé a considéré que les vues d'Einstein étaient compatibles avec la foi. À l'inverse, le Vatican dénonce alors « un authentique athéisme même s'il est dissimulé derrière un panthéisme cosmique ». Si Einstein rejette les croyances traditionnelles, il se distingue personnellement des athées et répète qu'il est « un non-croyant profondément religieux ». Une lettre manuscrite écrite en allemand un an avant sa mort, et adressée au philosophe Eric Gutkind, sera mise en vente sur e-Bay en octobre 2012, Einstein y écrit : « Le mot Dieu n'est pour moi rien de plus que l'expression et le produit des faiblesses humaines, la Bible un recueil de légendes, certes honorables mais primitives qui sont néanmoins assez puériles. Aucune interprétation, aussi subtile soit-elle, ne peut selon moi changer cela ». Einstein répondra d'ailleurs à un journaliste lui demandant s'il croit en Dieu : « Définissez-moi d'abord ce que vous entendez par Dieu et je vous dirai si j'y crois ». Un militant de l'athéisme comme Richard Dawkins considère également que la position d'Einstein était seulement de l'athéisme poétiquement embelli. Lors de la campagne d'affichage de slogans en faveur de l'athéisme sur les bus de Londres en 2008 (soutenue par Dawkins), une citation d'Einstein fut utilisée. Cela provoqua des protestations, car cette utilisation a tendance à assimiler Einstein à un athée. Dans ses mémoires, le diplomate Harry Kessler mentionne le fait d'avoir assisté à un échange entre une de ses connaissances et Einstein.

À la question « Professeur, est-ce vrai que vous êtes profondément religieux ? », Albert Einstein aurait répondu « Certainement, ça dépend des points de vue. Quand j'essaie de pénétrer avec nos moyens limités les secrets de la nature, on découvre derrière tous les rapports qu'on peut connaître quelque chose de très subtil, d'insaisissable, d'inexplicable. Ma religion, c'est le profond respect de ce qu'il y a au-delà des domaines que nous pouvons explorer. C'est ainsi en effet que je suis croyant ». Interrogé sur la personne de Jésus-Christ dans une interview qu'il accorde en 1929 au Saturday Evening Post, Albert Einstein qualifie le Jésus de l'écrivain Emil Ludwig de peu profond, ajoutant que personne ne peut exprimer le christianisme avec un bon mot. Il accepte en revanche sans hésitation l'existence du Jésus historique. Il déclare d'ailleurs, concernant les Évangiles, que personne ne peut les lire « sans ressentir la présence réelle de Jésus. Sa personnalité résonne dans chaque mot. Aucun mythe n'est rempli d'une telle vie... », il déclare quelques lignes plus loin « aucun homme ne peut nier le fait que Jésus ait existé, ou que ses paroles soient magnifiques. Bien que certaines aient été dites auparavant, personne ne les a exprimées si divinement ».

Einstein et la philosophie

Albert Einstein a lu les grandes œuvres de philosophie, notamment celle de Ernst Mach, qui eut une influence philosophique dans sa jeunesse, amenant le physicien à réfuter la conception mécaniste qui est à la base de l'acceptation de la mécanique classique. Albert Einstein marque son intérêt pour la vision de l'humanité que propose Friedrich Nietzsche, et certaines idées présentes dans les réflexions de Spinoza. Il propose une nouvelle vision du monde moderne par ses travaux scientifiques comme par ses ouvrages non scientifiques. Ainsi, dans son ouvrage *Comment je vois le monde* publié en 1934, un an après son installation aux États-Unis, Albert Einstein présente sa vision de l'humanité, et pose la question de la place de la science vis-à-vis de l'humanité. Les travaux d'Einstein ont en tout cas fait abandonner en philosophie l'idée d'un

temps absolu dans lequel baignerait un espace qui en serait séparé. Cette position novatrice avait en son temps amené Bergson à le rencontrer.

Einstein et le judaïsme

Albert Einstein s'intéresse aux questions du sionisme et de l'antisémitisme durant l'entre-deux-guerres, surtout entre 1919 et 1930, période pendant laquelle Einstein a produit de nombreux écrits attestant de ses positions sur ces questions. Durant l'entre-deux-guerres, il se rend en Palestine pour participer à la création de l'Université Hébraïque de Jérusalem.

Einstein et les mathématiques

Albert Einstein étudia les mathématiques auprès de professeurs comme Hurwitz ou Minkowski, mais reconnaît dans ses *Documents autobiographiques (Œuvres choisies)* que son « intuition dans le domaine des mathématiques n'était pas assez forte pour distinguer avec sûreté ce qui est essentiel et fondamental du reste. (...) Mon intérêt pour la connaissance de la nature était réellement plus fort; et du temps de mes études, il ne m'était pas évident que l'accès à une connaissance plus approfondie des principes de la physique passe obligatoirement par les méthodes mathématiques les plus raffinées ». D'ailleurs, Albert Einstein, en 1921, lors de la conférence berlinoise intitulée *la géométrie et l'expérience* (conférence considérée comme le texte épistémologique le plus important d'Einstein, selon l'étude de Michel Paty, *Einstein philosophe*), déclara des propos confirmant la « destitution » de la géométrie euclidienne : « Pour autant que les propositions de la mathématique se rapportent à la réalité, elles ne sont pas certaines, et pour autant qu'elles sont certaines, elles ne se rapportent pas à la réalité ». Cette prise de distance très significative chez Einstein, par rapport aux mathématiques, trouve son fondement par exemple dans un ouvrage de 1917, *La Théorie de la relativité restreinte et généralisée mise à la portée de tous* : la configuration géométrique/mathématique du monde devient elle-même quelque chose de relatif, dépendant de la distribution des masses et de leur vitesse.

Einstein et l'astrologie

Contrairement à la citation qui lui est attachée par de nombreuses publications, Einstein ne croyait pas en l'astrologie. La citation apocryphe qui lui est attribuée est : « L'astrologie est une science en soi, illuminatrice. J'ai beaucoup appris grâce à elle et je lui dois beaucoup. Les connaissances géophysiques mettent en relief le pouvoir des étoiles et des planètes sur le destin terrestre. À son tour, en un certain sens, l'astrologie le renforce. C'est pourquoi c'est une espèce d'élixir de vie pour l'humanité ». Ce faux a pour origine le *Huters astrologischer Kalender* de 1960, publié en 1959. La phrase a donc été forgée environ cinq ans après la mort d'Einstein. Son opinion négative sur l'astrologie est exprimée dans une introduction écrite en 1951 pour l'ouvrage de Carola Baumgardt. Einstein rappelle que Kepler avait su accepter l'idée que l'expérience seule pouvait décider de la validité d'une théorie mathématique, aussi belle soit-elle. Il cite alors l'astrologie comme illustration, dans la pensée képlérienne, d'un reste de manière de penser *animiste et téléologiquement orientée* omniprésente dans les recherches « scientifiques » de l'époque.

Einstein et le végétarisme

Deux végétariens réunis : A. Einstein et R. Tagore. « Rien ne pourra être plus bénéfique à la santé humaine ni accroître les chances de survie de la vie sur la Terre, qu'une évolution vers un régime végétarien » – Albert Einstein. Albert Einstein soutient la cause végétarienne. Il considère le végétarisme comme un idéal sans pourtant le pratiquer lui-même malgré quelques problèmes de conscience. Ses arguments se basent principalement sur des raisons de santé, mais il croit également à l'effet bénéfique du régime végétarien sur le tempérament des hommes. Un an avant sa mort, il décide de mettre en pratique ses idées et entame un régime végétarien. On peut trouver les raisons philosophiques de ce choix dans son livre *Comment je vois le monde*, concernant sa judaïté : « Les points essentiels de la conception juive de la vie paraissent les suivants : affirmation du droit à la vie pour toutes les créatures; la vie de l'individu n'a de sens qu'au service de l'embellissement et de l'ennoblissement de l'existence de tous les êtres vivants; la vie est sacrée, c'est-à-dire qu'elle est la valeur suprême d'où dépendent toutes les évaluations. » — Albert Einstein, *Comment je vois le monde, les idéals juifs*.

Le cerveau d'Einstein

En 1978, le journaliste Steven Levy apprend par son employeur le journal *New Jersey Monthly* que le cerveau du savant aurait été conservé et lui demande de le récupérer. Levy est accompagné par un

cameraman durant sa quête et le film est diffusé dans les années 1990 à la télévision en France. Après une longue enquête, il le retrouve en effet à Wichita (Kansas), chez le pathologiste qui avait procédé à son extraction, le D^r Thomas Harvey. Cette information souleva l'intérêt des médias. Le D^r Harvey déclara qu'il n'avait rien trouvé de particulier dans la structure physique du cerveau d'Einstein pouvant expliquer son génie. Mais de plus récentes études, parues notamment dans *Science et Vie*, concluent que le cerveau d'Einstein possédait un nombre élevé d'astrocytes. Selon le premier médecin autorisé à autopsier le cerveau d'Albert Einstein dans les années 1980, Marian Diamond, certaines zones de son cerveau, réservées aux tâches les plus hautes, possédaient une proportion de cellules gliales incroyablement élevée : « tout indique que les cellules gliales occupent une place déterminante dans le développement de l'intelligence ». Dans *Mythologies*, Roland Barthes écrivit un texte au sujet du cerveau d'Einstein, en restituant les fantasmes que celui-ci anime : comment donc est le cerveau d'un génie ? Il s'avère, et c'est là tout l'intérêt de la situation à en croire la plume de Barthes, que le cerveau du dit « génie » n'avait rien d'atypique. Une étude approfondie de la structure du cerveau révèle également que la scissure de Sylvius présente une inclinaison particulière, augmentant la taille de la zone du raisonnement abstrait au détriment de la zone du langage, ce qui pourrait expliquer qu'Einstein n'ait su parler que très tard.

En 2014, le neurologue américain Terence Hines publie une étude qui remet en cause la méthodologie et les conclusions qui ont été tirées avec trop d'enthousiasme, faisant suite à d'autres controverses.

Inventions et brevets

Outre la théorie de la relativité (d'abord restreinte puis généralisée) Einstein a aussi inventé des appareils et déposé de nombreux brevets en collaboration avec des amis :

- voltmètre ultrasensible : en 1908, avec Paul Habicht, il met au point un voltmètre capable de mesurer des tensions de l'ordre d'un dix-millième de volt. Ce « multiplicateur de potentiel Einstein-Habicht » est commercialisé à partir de 1912 ;
- réfrigérateur : avec son ancien étudiant et ami Leó Szilárd, il crée plusieurs types de réfrigérateurs (un système à absorption, un système à diffusion et un système électromagnétique). Ce dernier système s'appuie sur une « pompe électromagnétique » qui est encore utilisée pour transporter le sodium dans les réacteurs à neutrons rapides à caloporteur sodium (2005). Ces réfrigérateurs n'ont pas été commercialisés ;
- appareil de correction auditive : un des quarante brevets déposés avec Leó Szilárd.

Divers

Un einstein est une unité de mesure égale au nombre d'Avogadro multiplié par l'énergie d'un photon (lumière) (c'est donc l'énergie d'une mole de photons). Il existe un élément chimique nommé d'après Einstein : l'einsteinium. 2005 fut l'année mondiale de la physique, mais aussi l'année d'Einstein, en commémoration du centenaire de l'*annus mirabilis*. La date de naissance d'Albert Einstein est également la journée de π . De nombreuses citations célèbres sont, à tort, attribuées à Einstein de façon fréquente.

« Insanity is doing the same thing over and over again and expecting different results » (« la folie consiste à faire la même chose encore et encore et à attendre des résultats différents »). Le véritable auteur de cette citation est Rita Mae Brown, dans *Sudden Death*.

Distinctions

- 1921 : Prix Nobel de physique
- 1929 : Médaille Max-Planck
- 1931 : Prix Jules-Janssen
- 1935 : Médaille Franklin

Une nouvelle toute récente (février 2016) vient encore ajouter une énorme pierre à l'édifice déjà considérable des travaux d'Albert Einstein. En 1916, il avait prédit (ce n'était alors qu'une théorie) l'existence dans l'Univers d'ondes gravitationnelles. Cette existence vient d'être démontrée 100 ans plus tard exactement ! Nous y consacrons une brève Annexe III à la fin de ce document.

3) Edwin Powell Hubble (1889-1953)

Edwin Powell Hubble (20 novembre 1889 - 28 septembre 1953) est un astronome américain. Il a permis d'améliorer la compréhension de la nature de l'Univers en démontrant l'existence d'autres galaxies en dehors de notre Voie lactée. En observant un décalage vers le rouge du spectre de plusieurs galaxies, il a montré que celles-ci s'éloignaient les unes des autres à une vitesse proportionnelle à leur distance. Cette théorie, connue sous le nom de « loi de Hubble » avait néanmoins été découverte précédemment par M^{gr} Georges Lemaître, un prêtre et astronome belge qui avait publié son travail dans un journal bien moins visible. Il y a toujours une grande controverse à ce propos et beaucoup suggèrent que cette théorie devrait plutôt s'appeler la « loi de Lemaître », bien que ce changement n'ait pas retenu l'attention au sein de la communauté astronomique. La loi de Hubble est une des théories clé expliquant l'expansion de l'Univers. Hubble naît à Marshfield dans le Missouri le 20 novembre 1889. Il étudie les mathématiques et l'astronomie à l'université de Chicago où il obtient son diplôme en 1910. Titulaire d'une bourse d'étude, il passe ensuite 3 ans au Queen's College d'Oxford où il obtient un *Master of Arts* en droit. Il revient rapidement à l'astronomie à l'observatoire Yerkes, où il obtient son diplôme de *doctorat* en 1917. George Ellery Hale, le fondateur et directeur de l'observatoire du Mont Wilson, près de Pasadena en Californie, lui propose un poste de chercheur en 1917. Edwin accepte, mais il est envoyé au front en France, car les États-Unis viennent d'entrer dans le premier conflit mondial, après l'affaire du Lusitania. À son retour, en 1919, l'offre de George Ellery Hale tient toujours : il s'installe à Pasadena et y poursuit ses travaux jusqu'à la fin de sa vie. Peu de temps avant sa mort, il utilisa le premier le télescope Hale composé d'un réflecteur de 200 pouces (5,08 m de diamètre) qui venait d'être achevé. Le 28 septembre 1953, il meurt d'un accident vasculaire cérébral. Son épouse Grace est décédée en 1981 à 92 ans.

Travaux



Edwin Hubble



Le télescope de 2,5 m du Mont Wilson avec lequel Hubble a effectué ses principales découvertes

Existence des galaxies

Son arrivée au mont Wilson coïncide plus ou moins avec l'achèvement du télescope Hooker de 250 cm, le plus puissant télescope à l'époque. Les observations faites avec ce télescope par Hubble en 1923-1924 permettent d'établir que les « nébuleuses » observées précédemment avec des télescopes moins puissants ne font pas partie de notre Galaxie, mais constituent d'autres galaxies éloignées. Il annonce sa découverte le 30 décembre 1924. La première nébuleuse identifiée comme une galaxie n'est pas M31 (la Galaxie d'Andromède), mais la petite galaxie NGC 6822 située dans la constellation du Sagittaire (1925). Suivront ensuite M33 (la Galaxie du Triangle) en 1926 et M31 en 1929. Il a également classifié les galaxies en les regroupant sur des critères morphologiques (séquence de Hubble).

Décalage vers le rouge

Le **décalage vers le rouge** (*redshift* en anglais) est un phénomène astronomique de décalage vers les grandes longueurs d'onde des raies spectrales et de l'ensemble du spectre, ce qui se traduit par un décalage vers le rouge pour le spectre visible, observé parmi les objets astronomiques lointains. Suite aux travaux de Tolman et Hubble c'est un phénomène bien documenté, considéré comme la preuve initiale de l'expansion de l'Univers et du modèle cosmologique avec le Big Bang. Dans cette acception, ce phénomène n'est pas produit par effet Doppler-Fizeau, mais est une conséquence de la dilatation de l'espace provoquée par l'expansion de l'univers. Le terme est également employé pour la notion plus générale de décalage spectral, soit vers le rouge, soit vers le bleu, observé parmi les objets astronomiques selon qu'ils s'éloignent ou se rapprochent, indépendamment du mouvement général d'expansion. Dans cette acception, il est synonyme d'effet Doppler-Fizeau.

Définition et mesure

Le décalage spectral est aisément mesurable car les raies spectrales des atomes sont identifiables et bien connues, par exemple grâce à des mesures en laboratoire. Il est alors aisé de repérer un décalage entre λ_0 , la longueur d'onde observée en laboratoire (qui doit être celle réellement émise par la source), et λ_{obs} celle observée par les instruments astronomiques.

Le décalage spectral est mesuré par

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0}{\lambda_0}$$

On utilise fréquemment dans les calculs l'expression

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_0}$$

Ce décalage peut être observé vers le rouge (décalage vers les grandes longueurs d'onde : z positif) ou vers le bleu (décalage vers les courtes longueurs d'onde : z négatif). Dans le cas des objets astronomiques, le décalage est remarquable car il est le même sur l'ensemble du spectre, ce qui implique qu'il s'agit d'une conséquence d'un seul et même phénomène, et non d'un phénomène particulier à un type d'atome.

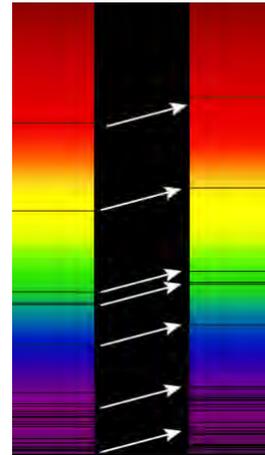
Histoire

Le décalage spectral du son est bien connu : le même son émis par un objet en mouvement nous semble plus aigu lorsque l'objet s'approche et plus grave lorsqu'il s'éloigne. Le même phénomène pour la lumière fut découvert par Hippolyte Fizeau en 1848 dans le cadre de la mécanique classique. La relativité restreinte d'Albert Einstein (1905) permit de généraliser le calcul du décalage spectral aux sources se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière. En 1929, après une longue série d'observations, l'astronome Edwin Hubble (en collaboration avec Milton Humason) énonça la loi de Hubble. Il apparaît que la lumière en provenance des galaxies distantes subit, en moyenne, un décalage vers le rouge proportionnel à leur distance. L'effet s'observe en moyenne : on observe des galaxies dont la lumière est plus ou moins décalée vers le rouge, ou même décalée vers le bleu, comme la galaxie d'Andromède. En appliquant l'hypothèse que cela provient d'un mouvement de la source, par effet Doppler, on en a déduit que, en moyenne, les sources s'éloignent de nous d'autant plus vite qu'elles sont déjà plus loin (ce qui n'exclut pas que certaines sources se rapprochent de nous, en raison des mouvements locaux). Cette interprétation s'avère aujourd'hui incorrecte, et l'interprétation moderne se base sur plusieurs autres effets dont la relativité générale, qui introduit un décalage vers le rouge non relié à un effet Doppler.

Causes du décalage spectral

Le décalage vers le rouge peut avoir plusieurs causes :

L'expansion de l'Univers



Lorsqu'un astre se déplace, ses raies spectrales sont également décalées

Actuellement, constatant un décalage vers le rouge de la lumière émise par des sources cosmologiques quasiment proportionnel à leur distance, les modèles cosmologiques dominants l'interprètent comme un effet de l'expansion de l'Univers. Il ne s'agit donc plus d'un effet Doppler comme on le présente encore parfois aujourd'hui, mais bien d'un effet de relativité générale qui se comprend quantitativement en disant que l'expansion, en « allongeant » l'Univers, allonge aussi la longueur d'onde de tous les photons de l'Univers. Il y a « comobilité » des galaxies qui sont entraînées par cette expansion. Le décalage vers le rouge dû à l'expansion de l'Univers s'écrit alors :

$$1 + z = \frac{a_0}{a(t)}$$

où $a(t)$ est le facteur d'échelle à l'époque où l'objet a émis la lumière qui nous parvient et a_0 la valeur actuelle du facteur d'échelle. En pratique, le facteur d'échelle croît avec le temps car l'Univers est en

expansion. La quantité $\frac{a_0}{a(t)}$ est donc supérieure à 1, et z est positif, ce qui correspond comme attendu à un décalage vers le rouge.

Le décalage vers le rouge cosmologique permet de définir le temps de regard vers le passé d'un objet et d'avoir une estimation de son âge.

Décalage vers le rouge cosmologique et conservation de l'énergie

La dilatation de l'espace a pour effet d'augmenter la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique, et donc de diminuer son énergie, du fait de la relation de Planck-Einstein $E = h\nu$, ν étant la fréquence du rayonnement (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Cette perte d'énergie n'est pas une apparence : le fond diffus cosmologique est le rayonnement ayant subi le plus grand décalage vers le rouge, avec un facteur z de l'ordre de 1 000, et correspond à une température et une énergie très basse de l'ordre de 3 Kelvin (-270 °C), bien inférieure à l'énergie d'origine.

Or, la conservation de l'énergie est par ailleurs considérée comme un des principes fondamentaux de la physique. La question se pose donc de savoir dans quelle mesure le décalage vers le rouge cosmologique remet en question le principe général de conservation de l'énergie. Ce problème avait été remarqué par Edwin Hubble lui-même dès 1936, sans que celui-ci ne propose de solution à ce problème. Bien que ce sujet soit toujours débattu, l'opinion générale est que l'expansion cosmologique provoque une perte réelle d'énergie, et le principe de conservation d'énergie doit être vu comme une loi de portée locale, qui ne s'applique pas à un niveau global dans un univers gouverné par les lois de la relativité générale.

Dans le modèle d'univers de Friedmann-Lemaître, utilisé pour étudier l'expansion de l'Univers, les équations de Friedmann donnent comme équation gouvernant la variation, due à l'expansion, de la densité d'énergie ρ :

$$\dot{\rho}c^2 + 3H(\rho c^2 + p) = 0 \quad p \text{ étant la pression générant l'expansion.}$$

Cette équation exprime que la variation de la densité d'énergie dans le temps est nulle, et peut être interprétée comme une loi *locale* de conservation d'énergie. Pour une variation de volume dV , $\rho c^2 dV$

représente la diminution locale de l'énergie gravitationnelle due à l'expansion, et pdV le travail réalisé par l'expansion. En relativité générale, l'énergie ne possède pas de signification à l'échelle globale, c'est le travail qui a une signification globale.

Le mouvement de la source



Les ondes qui proviennent d'une source lumineuse sont plus longues lorsque celle-ci s'éloigne d'un observateur à la gauche. Les ondes sont « étalées » et la lumière qui nous parvient est donc rouge. C'est le décalage vers le rouge ou redshift.

Légende :

1 : Ondes rallongées à l'arrière de la source lumineuse dues à son déplacement.

2 : Sens de déplacement de la source lumineuse.

3 : Source lumineuse.

4 : Ondes raccourcies à l'avant de la source lumineuse dues à son déplacement.

L'effet Doppler dû au mouvement de la source est la première idée et encore la plus présente. Si $z > 0$, le décalage est vers le rouge, la source s'éloigne ; si $z < 0$, le décalage est vers le bleu, elle se rapproche. Quand la vitesse relative de la source projetée le long de la ligne de visée, v , est petite par rapport à la vitesse de la lumière c le décalage vaut : $z \approx v/c$

et, réciproquement, on peut calculer la vitesse de la source lorsque le décalage z est beaucoup plus petit que l'unité : $v \approx zc$

Lorsque la vitesse de la source n'est pas petite devant celle de la lumière, il vaut mieux utiliser la formule :

$$z + 1 = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$$

L'effet gravitationnel

La théorie de la relativité générale d'Einstein prédit que la lumière se déplaçant dans un champ de gravitation non homogène subit un décalage vers le rouge ou vers le bleu. Cet effet est appelé le décalage d'Einstein. Sur la Terre, il est faible mais mesurable en utilisant l'effet Mössbauer. À proximité d'un trou noir, cet effet deviendrait significatif au point qu'à l'horizon des événements le décalage serait infini. Ce décalage gravitationnel fut proposé dans les années 1960 comme explication des grands décalages vers le rouge, observés pour les quasars, mais cette théorie n'est guère acceptée aujourd'hui.

La variation de la vitesse de la lumière

La vitesse de la lumière pourrait diminuer avec le temps, des théories supposent même qu'au début de l'Univers (phase d'Inflation) elle aurait pu être infinie. Mais ces théories restent difficilement soutenables même si, présentement, on mesure directement cette vitesse avec une bonne précision aux échelles cosmologiques. Il existe néanmoins de nombreuses mesures indirectes qui font qu'un tel discours, difficile à soutenir, peut s'envisager. Par exemple, quand il s'agit d'expliquer l'abondance des éléments fondamentaux ou divers autres effets gravitationnels liés au comportement de la lumière dans un champ gravitationnel. Il existe de nombreuses observations supportant avec précision l'idée d'un univers en expansion et, le décalage vers le rouge n'est qu'un élément parmi de nombreux autres. Il est donc nécessaire de garder en tête qu'une variation de la constante c (une fois une telle chose définie proprement) ne changerait probablement que très peu nos idées actuelles sur l'expansion de l'univers et son évolution en dehors des « premiers instants ».

Mesure des distances et des vitesses cosmologiques, application au passé de l'univers

Le décalage vers le rouge appliqué aux galaxies lointaines permet d'en estimer la distance. Cette technique constitue la seule méthode présentement utilisable, parmi les méthodes existantes, pour déterminer la distance des astres les plus éloignés. Pour cela, on écrit la loi de Hubble comme une relation entre la distance et la vitesse radiale des objets observés, on mesure la vitesse radiale de l'objet (le décalage vers le rouge de

raies dont la fréquence est connue) et on en déduit sa distance. Cette méthode ne convient pas pour les objets trop proches, dont le mouvement propre l'emporte sur le mouvement induit par l'expansion de l'univers et elle est parfois contestée pour les objets compacts tel les quasars (voir, en particulier, les travaux de Halton Arp). Son utilisation pour les objets très lointains est également délicate car dépendant du modèle cosmologique que l'on considère. Si l'on se place dans le cadre d'un modèle cosmologique donné, il existe une correspondance entre le décalage vers le rouge et la distance, et l'on exprime parfois les distances en terme du décalage vers le rouge noté z . Par exemple, pour le rayonnement cosmologique de fond on peut estimer que $z \approx 1100$. Compte tenu du nombre important de modèles cosmologiques encore à l'étude, il existe autant de résultats différents aux calculs issus de mesures de distances par cette méthode.

Système de classement morphologique

Edwin Hubble a aussi établi un système permettant de classer les galaxies. Ce système est toujours utilisé aujourd'hui.

Autres travaux et découvertes

Il est lauréat de la Médaille Franklin en 1939 pour ses travaux sur les nébuleuses. Il reçoit la médaille d'or de la Royal Astronomical Society en 1940. Le télescope spatial Hubble a été nommé en son honneur, ainsi que l'astéroïde (2069) Hubble. Il a découvert l'astéroïde (1373) Cincinnati le 30 août 1935.

4) Clyde William Tombaugh (1906-1997)

Clyde William Tombaugh, né le 4 février 1906 à Streator, dans l'Illinois et mort le 17 janvier 1997 à Las Cruces au Nouveau-Mexique, est un astronome américain. Il est notamment connu pour avoir découvert la planète naine Pluton en 1930.



Télescope de l'observatoire Lowell ayant servi à la découverte de Pluton



Tombaugh devant le télescope qu'il a construit (1928)

En bas : Tombaugh en 1931

Tombaugh se passionne très tôt pour l'astronomie grâce à son père, agriculteur, et à son oncle, qui lui apprennent à regarder les étoiles. Avec ses premiers instruments astronomiques, qu'il fabrique à partir de pièces de voitures et de machines agricoles, il observe pendant des heures le ciel, notamment les planètes. En 1928, il décide d'envoyer des croquis de Jupiter et Mars réalisés à l'aide de son télescope-maison de 22 cm, à l'Observatoire Lowell près de Flagstaff (Arizona) dans l'Arizona, simplement pour recueillir

quelques commentaires d'experts. Impressionné par ses croquis, Vesto Slipher, le directeur de l'observatoire, engage Tombaugh pour 90 dollars par mois afin qu'il participe à une campagne de photographies à l'aide du nouveau télescope de 13 pouces (environ 32,5 cm), encore en assemblage. Tombaugh arrive à Flagstaff à la mi-janvier 1929. Son travail consiste à rechercher une planète trans-neptunienne (appelée Planète X) dont l'existence a été prédite par Percival Lowell. L'assemblage du télescope terminé, la campagne photographique commence en avril 1929 (c'est la troisième depuis le début des recherches en 1905). Elle se heurte très vite à des défauts de conception du télescope qui causent la perte de nombreux clichés. De plus, le froid provoque des fissures dans les plaques photographiques. Tombaugh utilise une machine destinée à la comparaison des photographies, appelée comparateur à clignotement. Prenant d'abord deux, puis trois séries de photos à quelques jours d'intervalle, il va pouvoir repérer le point mobile de la planète sur ses clichés. Après une année de pénibles observations, il trouve la planète recherchée le 18 février 1930. La découverte de Pluton est confirmée le mois suivant. Plus tard, Pluton se révélera ne pas être la Planète X de Lowell. Vesto Slipher, le chef de Clyde Tombaugh, prit tellement ombrage de la découverte de celui-ci, qu'il l'écarta d'abord du projet de recherche de planètes, sans le citer comme découvreur de Pluton, pour finalement aller jusqu'à le licencier. Heureusement, à l'observatoire Flagstaff personne n'est dupe et peu après le jeune Tombaugh devient la vedette internationale de l'astronomie en tant que le véritable découvreur de la « neuvième planète » du système solaire. En 1932, Tombaugh obtient le droit d'entrer à l'Université du Kansas, directement en deuxième année. En 1934, il épouse Patricia Edson. Il obtient son doctorat en 1939. Après la découverte de Pluton, Tombaugh poursuit pendant 13 ans les recherches de la Planète X sans jamais la trouver. Cependant, il fera d'autres découvertes durant ses observations : une nova (en 1932), deux comètes, quatorze astéroïdes, cinq amas ouverts, un amas globulaire, plusieurs amas de galaxies et un superamas. Tombaugh enseigne l'astronomie à l'Université de l'État d'Arizona et à l'Université de Californie jusqu'en 1946 où il s'installe au Nouveau-Mexique. De 1955 à sa retraite en 1973, il enseigne à l'Université du Nouveau Mexique. Il restera actif, passionné par les planètes.

Honneurs

L'astéroïde (1604) Tombaugh, découvert en 1931, a été nommé en son nom.

La sonde spatiale New Horizons, lancée en 2006 et ayant survolé Pluton en juillet 2015 avant de continuer son voyage dans la ceinture de Kuiper, emporte une partie de ses cendres dans une urne funéraire. Tombaugh est donc aujourd'hui (2016) l'homme ayant été le plus loin de la Terre. La grande zone claire en forme de cœur sur Pluton a été nommée région Tombaugh.

Les 14 astéroïdes découverts par Tombaugh :

Designation	Découverte
2839 Annette	5 octobre 1929
<u>2941 Alden</u>	24 décembre 1930
<u>3310 Patsy</u>	9 octobre 1931
3583 Burdett	5 octobre 1929
3754 Kathleen	16 mars 1931
<u>3775 Ellenbeth</u>	6 octobre 1931
<u>3824 Brendalee</u>	5 octobre 1929
<u>4510 Shawna</u>	13 décembre 1930
4755 Nicky	6 octobre 1931
5701 Baltuck	3 novembre 1929
(6618) 1936 SO	16 septembre 1936
<u>7101 Haritina</u>	17 octobre 1930
7150 McKellar	11 octobre 1929
<u>(8778) 1931 TD3</u>	10 octobre 1931

5) Résumé : De la Belle Époque à l'entre-deux-guerres

Max Planck publia en 1900 la loi du rayonnement du corps noir, preuve de l'augmentation de l'entropie de l'Univers et premier pas vers la théorie des quanta. L'année suivante, Charles Dillon Perrine décrit avec George Willis Ritchey un halo de gaz autour de l'étoile Nova Persei 1901 animé d'une vitesse apparente supérieure à celle de la lumière, puis découvrit deux nouveaux satellites naturels de Jupiter. Max Wolf découvrit en 1906 le premier astéroïde troyen (Achille) et à peu près simultanément, Johannes Franz Hartmann donna les premières preuves de l'existence d'un milieu interstellaire.

Albert Einstein avec sa théorie de la relativité restreinte et générale a jeté les bases de plusieurs théories de l'astrophysique moderne. La fusion nucléaire est une conséquence de l'équivalence masse-énergie, certains objets extrêmes comme les étoiles à neutrons et les trous noirs doivent leur existence théorique à la théorie de la relativité; la cosmologie elle-même repose en grande partie sur cette théorie. Henry Norris Russell, reprenant les travaux antérieurs d'Ejnar Hertzsprung, imagina en 1913 le diagramme de Hertzsprung-Russell : il s'agit d'une méthode fondée sur l'analyse spectrale du rayonnement d'une étoile pour déterminer son stade d'évolution. Le 30 juin 1908, se produisit la catastrophe du météorite de la Toungouska (40 km² dévastés), et on découvrit en 1920 la plus lourde sidérite de tous les temps (dans la Namibie, 60 t, 3 m × 2,8 m × 1,2 m).

La compréhension du monde physique par l'astronomie est redevable à Arthur Eddington de l'hypothèse que la fusion nucléaire, mentionnée plus haut, est la source d'énergie des étoiles (1920); à Edwin Hubble, de la reconnaissance que les nébuleuses spirales sont des objets extragalactiques (1923) ainsi que de l'hypothèse de l'expansion de l'Univers (1929), à laquelle il parvint en rapportant l'éloignement des galaxies à leur vitesse d'éloignement. L'hypothèse d'un univers en expansion depuis le Big Bang initial est aujourd'hui généralement admise.

En 1923, Edwin Hubble parvint à établir que la galaxie d'Andromède (M 31) est située largement en dehors de la Voie lactée, et donc qu'il existe d'autres galaxies que la nôtre. Georges Lemaître interpréta en 1927 le décalage vers le rouge des objets célestes lointains, découvert par Milton Humason, comme une expansion généralisée de l'Univers. Puis en 1929, Hubble démontra de façon certaine que le décalage vers le rouge du spectre des galaxies est proportionnel à leur distance. Bien que ses calculs aient dû être corrigés depuis à de multiples reprises, la constante fondamentale de la cosmologie continue de porter son nom (constante de Hubble). La durée qui se déduit par le calcul de la loi de Hubble permet de dater le début de l'expansion de l'Univers (Big Bang). Hubble lui-même était arrivé à 2 milliards d'années ; aujourd'hui, les chercheurs s'accordent sur une valeur de 14 milliards d'années. C'est en attribuant à une huitième planète les défauts d'ellipticité de la trajectoire d'Uranus qu'en 1846 on avait découvert Neptune. Pourtant après correction, les trajectoires de ces deux planètes présentaient toujours des anomalies sensibles, qui se révélèrent par la suite dues à une erreur d'évaluation de la masse de Neptune. C'est pour cette raison qu'on se mit à l'époque en quête d'une neuvième planète, « Transneptune ». Au cours de ces recherches, Percival Lowell (1855–1916) avait lui-même photographié Pluton à son insu dès 1915, mais il ne l'avait pas identifiée comme une planète. Ce n'est que le 18 février 1930 que Clyde Tombaugh la mit en évidence dans l'observatoire Lowell fondé par P. Lowell en comparant un certain nombre de plaques photographiques à l'aide d'un comparateur à clignotement. Jusqu'à un passé récent, on voyait encore en Pluton la neuvième planète du système solaire. Dans le cadre de son travail à l'observatoire du pic du Midi de Bigorre, Bernard Lyot découvrit que la surface de la Lune présentait des traces caractéristiques de cendres volcaniques et qu'il se produit des tempêtes de sable sur Mars. En 1931, Karl Jansky localisa la source radio « Sagittarius A ». Puis en 1933, Walter Baade et Fritz Zwicky émettent leur théorie de l'évolution des supernovae en étoiles à neutrons, dont la densité avoisine celle du noyau d'un atome.

6) Résumé : L'après-guerre et les débuts de la radioastronomie

L'identification des phénomènes physiques qui précèdent cet effondrement en étoile à neutrons date de 1938, l'année même où Nicholson découvrit les 10^e et 11^e satellites de Jupiter, Lysithéa et Carmé; elle est due aux physiciens Hans Bethe et Carl Friedrich von Weizsäcker, qui découvrirent la fusion d'hydrogène en hélium *via* le cycle C-N (processus de fusion stellaire, dit cycle Bethe-Weizsäcker). On en déduit que les étoiles naissent et se maintiennent en activité par fusion continue d'hydrogène, jusqu'à ce que leurs réserves d'hydrogène soient épuisées. Il s'ensuit un flash de l'hélium, où les noyaux d'hélium sont convertis

par fusion en noyaux d'éléments plus lourds. En 1965, Kippenhahn, Thomas, et Weigert, avec d'autres astronomes et physiciens, mettent en évidence qu'il se produit même des phénomènes de fusion d'hydrogène et d'hélium dans les étoiles géantes (masse d'environ trois fois celle du Soleil). Le stade final de ces processus est la formation d'un trou noir.

C'est avec cette antenne mise au point aux Laboratoires Bell qu'en 1965, Penzias et Wilson parvinrent à capter un rayonnement radio uniforme, dit « fond diffus cosmologique ». Le premier contact radar avec un astre fut établi le 10 janvier 1946 (1^{er} écho radar reçu de la Lune, d'une durée de 2,4 secondes); il s'ensuivit la découverte en 1951 d'un rayonnement cosmique de 21 cm de longueur d'onde (émis par l'hydrogène interstellaire), puis d'un rayonnement de 2,6 mm (par le monoxyde de carbone) et même en 1956 la première réception d'un rayonnement cosmique par une décharge électrique dans l'atmosphère de Vénus, jusqu'à la découverte en 1965 du fond diffus cosmologique à 3 K (un écho du Big Bang) : c'était l'acte de naissance de la radioastronomie.

7) Inventaire chronologique de certaines découvertes et avancées importantes en astronomie entre 1937 et 2000 :

- 1937 : découverte par Fritz Zwicky des anomalies dans les courbes de rotation des galaxies, preuve indirecte de la présence de matière noire.
- 1938 : à la suite de la découverte du neutron, Fritz Zwicky propose qu'une supernova est la conséquence de l'effondrement d'une étoile en étoile à neutrons.
- 1939 : Calcul de l'effondrement d'une étoile en trou noir par Robert Oppenheimer et Snyder. Hans Bethe découvre que les réactions nucléaires sont la source d'énergie des étoiles.
- 1942 : **Découverte de l'émission radio du Soleil.**
- 1946 : Première mesure d'un champ magnétique en dehors du Système Solaire, dans l'étoile 78 Virginis. Premiers travaux sur la nucléosynthèse dans les étoiles (Fred Hoyle).
Première détection certaine de sources astronomiques d'ondes radio (Cygnus A) par J. S. Hey, S. J. Parsons et J. W. Phillips. George Gamow réalise que l'univers primordial était non seulement dense mais aussi chaud et donc siège de réactions nucléaires (nucléosynthèse primordiale).
- 1947 : Viktor Ambartsumian découvre les associations stellaires. Bart Bok propose le terme de « globule » pour désigner les objets désormais appelés globules de Bok, et en explique la nature.
- 1948 : **Découverte de l'émission du Soleil dans le domaine des rayons X.**
Gerard Kuiper découvre Miranda satellite d'Uranus.
De nouvelles sources d'ondes radios sont découvertes par J. G. Bolton, parmi lesquelles Taurus A (plus tard identifiée à la Nébuleuse du Crabe) et Centaurus A.
Hermann Bondi, Thomas Gold et Fred Hoyle propose la théorie de l'état stationnaire où le Big Bang n'a pas lieu.
Ralf Alpher et George Gamow prédisent l'existence du fond diffus cosmologique et donnent une estimation de sa température.
Frank Elder, Robert Langmuir et Herbert Pollack observent en laboratoire le rayonnement synchrotron.
- 1949 : Mise en service du télescope de 5,08 mètres (200 pouces) du Mont Palomar, le plus grand du monde à l'époque.
Gerard Kuiper découvre Néréide satellite de Neptune.
Identification des contreparties optique de plusieurs sources d'ondes radio. Centaurus A est en réalité NGC 5128 et Virgo A NGC 4486.
- 1950 : Hannes Alfvén, Nicoali Herlofson et Karl-Otto Kiepenheuer expliquent l'émission radio de la Galaxie par un rayonnement synchrotron.

- 1951 : Prédiction de l'émission par l'hydrogène d'une raie à 21 cm et découverte de cette émission dans la Voie lactée.
- 1952 : Walter Baade corrige la relation période-luminosité de certaines céphéides (sous classe des variables de type W Virginis), corrigeant la valeur de la constante de Hubble.
- 1954 : Cygnus A est identifiée comme étant une galaxie lointaine (décalage vers le rouge de 0,057, prouvant qu'une grande partie des sources radio sont extragalactiques).
- 1955 : Mise en service du radiotélescope géant de Jodrell Bank (75 mètres de diamètre).
- 1956 : Découverte de la nature double de Cygnus A (correspondant aux deux lobes de matière éjectés de part et d'autre du trou noir supermassif de cette galaxie).

Des méthodes plus précises de datation radioactive déterminent la valeur exacte de l'âge du système solaire (4,55 milliards d'années).

- 1957 : Compréhension des aspects essentiels de la nucléosynthèse stellaire par Margaret Burbidge, Geoffrey Burbidge, William Fowler, et Fred Hoyle (article B²FH). Seul Fowler obtiendra le prix Nobel de physique pour ces travaux.

Lancement du premier satellite artificiel Spoutnik 1 par l'Union soviétique et début de l'ère spatiale.

- 1958 : (29 juillet) Début de la NASA (National Aeronautics and Space Administration), agence nouvellement créée par les États-Unis pour rattraper leurs retards face aux Soviétiques. Elle reprend intégralement les centres de recherche et le personnel du NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), organisme fondé en 1915.

Allan Sandage corrige la valeur de la constante de Hubble.

Jan Oort met en évidence la présence de matière noire par la dynamique des galaxies.

- 1959 : **En percutant la Lune la sonde Luna 2 devient le premier objet à atteindre un autre astre. Premières photographies de la face cachée de la Lune, par la sonde soviétique Lunik 3.** Arkadi Migdal prédit la superfluidité de l'intérieur des étoiles à neutrons, confirmée en 1969 par l'observation du phénomène de glitches dans le pulsar de Vela.

- Vers 1960 : « Âge d'or » de l'étude des trous noirs.

- 1961 : **Pour la première fois de l'histoire de l'humanité un homme est lancé dans l'espace. Le soviétique Youri Gagarine réalise une orbite complète en 90 minutes avant de revenir sain et sauf sur la Terre.**

Horace W. Babcock propose une explication qualitative du cycle solaire de 11 ans.

- 1962 : **Découverte des quasars.**

Découverte de la première source astrophysique de rayons X (Scorpius X-1). Certaines de ces sources sont galactiques, d'autres extragalactiques.

- 1963 : Découverte de l'émission en rayons X de la nébuleuse du Crabe.
- 1964 : Découverte de Cygnus X-1, qui fut interprété par la suite comme étant le premier trou noir stellaire connu.

- 1965 : **Découverte du fond diffus cosmologique.**

Découverte du milieu intergalactique chaud (10^8 K par l'intermédiaire de son rayonnement X dans l'amas de Coma).

- 1966 : La sonde Venera 3 atteint Vénus.

Audouin Dollfus découvre Janus et Épiméthée, satellites de Saturne.

- 1967 : Découverte des pulsars par Jocelyn Bell et Antony Hewish à Cambridge.
- 1968 : James Peebles et Robert Dicke expliquent la masse des amas globulaires en utilisant des considérations liées à l'instabilité de Jeans

- 1969 : Découverte des sursauts gamma par les satellites militaires de surveillance Vela 5A et Vela 5B.
Neil Armstrong devient le premier homme à marcher sur la Lune.
Découverte des glitches dans le pulsar de Vela, prouvant que l'intérieur des étoiles à neutrons est superfluide.
- 1970 : Découverte des oscillations quasi-périodiques dans le spectre d'émission d'une binaire X (Scorpius X-1).
Lancement de la première mission spatiale entièrement dédiée à l'astronomie des rayons X, Uhuru.
La sonde soviétique Venera 7 devient le premier engin construit par l'homme à se poser sans dommage sur une autre planète (Vénus).
George R. Carruthers met en évidence l'hydrogène moléculaire par son absorption dans le domaine ultraviolet.
- 1972 : Première association entre une variable cataclysmique et une source de rayons X (EX Hydrae).
Première identification quasi-certaine d'un trou noir stellaire, la source Cygnus X-1 dans le système binaire formé avec l'étoile HDE 226868.
Lancement de la sonde Pioneer 10.
Lancement du premier satellite artificiel dévolu à l'étude des sources de rayons gamma, SAS-2 (15 novembre).
- 1973 : **Création de l'agence spatiale européenne.**
Lancement de la sonde Pioneer 11.
Pioneer 10 atteint Jupiter et transmet les premières images haute résolution de la planète et de certains de ses satellites.
Fin de la mission SAS-2 en raison d'un problème d'alimentation électrique.
- 1974 : Découverte du premier pulsar binaire, PSR B1913+16.
La sonde Mariner 10 transmet les premières images de Mercure.
- 1975 : Première détection de sources dans le domaine de l'ultraviolet extrême, par le satellite EUV.
Mise en service du plus grand télescope de l'époque, le Zelenchuk (6 mètres de diamètre).
Première découverte d'un objet céleste par son rayonnement gamma, PSR J0633+1746 (Geminga).
- 1976 : Mise en service de l'interféromètre radio Very Large Array (VLA).
Atterrissage de la sonde Viking 1 sur Mars.
- 1977 : Lancement des sondes HEAO-1 (12 août), Voyager 2 (20 août) et Voyager 1 (5 septembre). Ces deux dernières sont toujours opérationnelles en 2012.
Découverte des anneaux d'Uranus.
- 1978 : Lancement des missions International Ultraviolet Explorer (IUE) et HEAO-2 (Einstein, 12 novembre).
Découverte de Charon, satellite de Pluton par James W. Christy.
- 1979 : Passages de Voyager 1 puis de Voyager 2 au voisinage de Jupiter (5 mars et 9 juillet).
- 1980 : Passage de Voyager 1 à 124 000 km de Saturne (12 novembre).
Découvertes de Télésto et Calypso, par Bradford A. Smith, satellites de Saturne et troyen de Téthys
Découverte du premier pulsar X anormal, PSR J2301+5852 (2E 2259.0+5836)
- 1981 : Passage de Voyager 2 à 101 000 km de Saturne (26 août).
- 1982 : Découverte du premier pulsar milliseconde, PSR B1923+37.
- 1983 : Lancement de la mission européenne EXOSAT (26 mai).
Première détection de l'influence d'un sursaut gamma (GRB 830801) sur la haute atmosphère terrestre (1^{er} août).
Lancement du premier satellite observant dans l'infrarouge, IRAS.
- 1984 : Découverte du second pulsar X anormal, 1E 1048.1-5937.

- 1986 : **Passage de Voyager 2 à proximité d'Uranus (24 janvier).**
Les sondes spatiales Vega 1, Vega 2 et Giotto passent au voisinage de la comète de Halley et en photographient le cœur.
- 1987 : Explosion de la supernova SN 1987A et détection des premiers neutrinos émis par un autre astre que le Soleil.
Découverte de PSR B0042-73, premier pulsar connu du Petit Nuage de Magellan.
- 1989 : Lancement de la mission Magellan vers Vénus (4 mai).
Voyager 2 passe à 44 800 km de Neptune (25 août).
Lancement de la sonde Galileo (18 octobre) en direction de Jupiter.
Lancement du satellite COBE destiné à l'étude du fond diffus cosmologique (18 novembre).
- 1990 : **Lancement du télescope spatial Hubble (18 avril)**, du satellite ROSAT (1^{er} juin) et de la sonde Ulysses (6 octobre).
- 1991 : Détection d'un rayon cosmique de $3,2 \times 10^{20}$ eV, un des plus énergétiques connus à ce jour.
Pour la première fois un astéroïde est photographié de près : Galileo fournira d'étonnants clichés de Gaspra
- 1992 : Détection des anisotropies du fond diffus cosmologique par le satellite COBE.
Lancement du satellite Extreme Ultraviolet Explorer (EUVE, 7 juin).
Le pape Jean-Paul II reconnaît la conduite erronée de certains théologiens du XVII^e siècle lors du procès intenté à Galilée (31 octobre).
Découverte du premier objet (hormis Pluton) de la ceinture de Kuiper (1992 QB1)
- 1993 : Lancement du satellite ASCA (20 février).
Galileo photographie de près l'astéroïde Ida et découvre le premier satellite astéroïdal (Dactyl)
- 1994 : Collision des fragments de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter.
Première mise en évidence du phénomène de jet supraluminique avec le microquasar GRS 1915+105
- 1995 : **Découverte de la première exoplanète par Michel Mayor et Didier Queloz (de l'observatoire de Genève), d'après des observations qu'ils ont réalisées à l'observatoire de Haute-Provence grâce à la méthode des vitesses radiales. L'étoile hôte est 51 Pegasi, dans la constellation de Pégase, à environ 40 années lumière de la Terre.**
Arrivée de la sonde Galileo au voisinage de Jupiter (7 décembre).
- 1996 : Première détection d'une étoile à neutrons isolée qui ne soit pas vue sous la forme d'un pulsar.
- 1997 : Première observation d'une contrepartie optique d'un sursaut gamma (GRB 970228).
Lancement de la sonde Cassini-Huygens en direction de Saturne (15 octobre).
Un module de la sonde Mars Pathfinder atterrit sur Mars. Le robot Sojourner explore les environs du site d'atterrissage.
La sonde NEAR Shoemaker photographie de près l'astéroïde Mathilde.
Identification formelle de la nouvelle classe des pulsars X anormaux.
- 1998 : **Découverte de l'accélération de l'expansion de l'univers.**
- 1999 : **Première lumière du VLT au Chili à 2 400 m d'altitude.**
Lancement de la mission Télescope spatial FUSE (24 juin) et des télescopes spatiaux Chandra (23 juillet) et XMM-Newton (10 décembre).
- 2000 : La sonde NEAR Shoemaker atteint l'astéroïde Éros sur lequel elle parvient à se poser l'année suivante.
Découverte dans la ceinture de Kuiper d'un astéroïde de taille équivalente à Cérés : Varuna

8) Résumé : Les années 1970

Le premier radiotélescope allemand a été mis en service le 12 mai 1971 à Effelsberg, dans l'Eifel. Mais la recherche se poursuivait toujours dans le domaine de l'astronomie optique : James van Allen entreprit en 1973 une inspection systématique du ciel, répertoriant par angle solide d'un degré carré jusqu'à 31 600 étoiles et 500 galaxies de luminosité supérieure à +20^m, soit 1,3 milliard d'étoiles et 20 millions de galaxies, comportant chacune environ 200 milliards d'étoiles. Entre-temps, en 1974, Stephen Hawking proposait sa théorie du rayonnement des trous noirs. Le 29 mars de la même année, exploitant l'effet de fronde gravitationnelle, la sonde Mariner 10 atteignit pour la première fois la planète Mercure (passages ultérieurs : 21 septembre 1974, 16 mars 1975, etc.), la plus proche du Soleil (avec un passage au droit de Vénus le 5 février 1974). La première description des anneaux d'Uranus date du 10 mars 1977. À partir du milieu des années 1970, plusieurs programmes de recherche en astronomie et de vol spatial s'attaquaient à la question de recherches de mondes extraterrestres habités. La première tentative réelle de contact avec des civilisations extraterrestres fut entreprise le 16 novembre 1974 (émission d'un signal radio de 1 679 kB vers l'amas globulaire M13; réception possible par la cible au 28^e millénaire). Deux ans plus tard (1976), Joachim Trümper capta un champ magnétique stellaire de forte puissance (un rayonnement de plus de 58 keV d'un tourbillon d'électrons dans HZ Herculis : 5×10^{12} gauss, à comparer avec le champ magnétique naturel terrestre : à peu près 0,5 gauss !) et Charles Kowal découvrit en 1977 le premier Centauride, l'astéroïde Chiron (un planétoïde éloigné, de 200 à 600 km de diamètre, et dont la trajectoire est de 8,5 à 18,9 ua), l'année même où les vols spatiaux s'attaquaient à l'exploration en dehors du système solaire.



La sonde spatiale Voyager



Cliché de Jupiter pris par Voyager 1 (1979)

9) L'exploration du cosmos et les sondes spatiales

Le 3 mars 1972, la NASA lança la sonde spatiale Pioneer 10 qui, le 3 décembre 1973, était la première sonde à croiser au large de Jupiter. Sa sœur jumelle Pioneer 11 décolla le 6 avril 1973, passa au large de Jupiter le 3 décembre 1974 et le 1^{er} septembre 1979 était la première sonde à croiser au large de Saturne.

Le 5 septembre 1977, la NASA lança la sonde spatiale Voyager 1, qui doubla Jupiter à une distance de 675 millions de km le 5 mars 1979, puis dépassa Saturne en novembre 1980. 15 jours avant, c'était la sonde Voyager 2 qui avait pris son envol : exploitant au mieux l'effet de fronde gravitationnelle, cette sonde fut la première à quitter le système solaire (passage au large de Jupiter le 9 juillet 1979, au large d'Uranus en janvier 1986, de Neptune en 1989), et lors même que ce vol était en cours, l'astronome américain James W. Christy annonça la découverte d'un satellite de Pluton, Charon. On découvrit les premières molécules organiques du cosmos éloigné en 1977-78 dans les nuages interstellaires : notamment de l'acide acétique, de l'acétonitrile, de l'aminométhane, de la vapeur d'eau, de l'éthanol, etc., qui constituent autant d'indications radioastronomiques sur les origines de la vie, et les voyages inhabités atteignirent les limites de notre système solaire (en 1979-1980 avec les sondes Pioneer 11, Voyager 2 : découvertes de nombreux satellites de Jupiter et de Saturne, premières photographies et explorations des anneaux de Saturne en 1984; avec Pioneer 10 : premier croisement de l'orbite de Pluton onze ans après son envol).

Il est absolument remarquable de constater que les sondes Voyager (conçues et construites il y a quarante ans dans les années 1970) fonctionnent encore aujourd'hui, même si certains de leurs instruments sont désormais hors-service.

*A l'heure où nous écrivons ces lignes (Avril 2023), **Voyager 1** se déplace encore à la vitesse de 17 km/s et se trouve à plus de 23,870 milliards de km du Soleil (159,56 ua) dans la première partie du nuage de Oort, elle va bientôt arriver à l'héliopause, limite fluctuante de l'héliosphère (zone d'activité des vents solaires). Il lui reste environ 15 % de son carburant. Le temps d'une transmission aller-retour entre la Terre et Voyager 1 est de plus de 44 heures. Les instruments à bord seront désactivés progressivement jusqu'en 2025, date à laquelle la sonde deviendra muette.*

*En ce qui concerne **Voyager 2**, qui reste à ce jour la seule sonde ayant survolé successivement Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. C'est Voyager 2 qui a découvert les anneaux de Neptune, 10 nouveaux satellites de cette planète et survolé et photographié Triton, sa plus grosse Lune. Elle a permis une mesure précise de la taille de Triton, mis en évidence les tempêtes de Neptune (la grande tache sombre) et a y mesuré des vents à près de 2.000 km/h. La sonde se déplace à 15,5 km/s et se trouve à 19,9 milliards de km du soleil (133,02 ua). Elle est aussi au-delà de la ceinture de Kuiper (30 à 55 ua) dans la première partie du nuage de Oort. Il lui reste 25 % de carburant et les transmissions aller-retour entre la Terre et Voyager 2 prennent près de 36 heures. Elle devrait aussi cesser de transmettre des données vers 2025-2030.*

Les sondes Voyager sont encore et pour longtemps dans le système solaire et l'influence gravitationnelle du Soleil. Elles devraient quitter le système solaire dans 20.000 à 40.000 ans !

10) Les années 1980 et 1990

La sonde ISEE-3 fut la première à traverser la queue d'une comète : le 11 septembre 1985, elle put prélever et analyser chimiquement le sillage de la comète Giacobini-Zinner. Mais la sensation des années 1980, pour le domaine de l'analyse stellaire, fut l'apparition de la supernova de 1987 dans le Grand Nuage de Magellan (LMC) le 24 février : pour la première fois, on enregistrait et photographiait dès le début l'explosion d'une supernova, les neutrinos émis ayant atteint la Terre avant que les premiers signaux optiques puissent être détectés. Si les instruments d'observation se sont sans cesse perfectionnés, ce n'est qu'au début des années 1990 qu'il devint possible d'effectuer des observations hors de l'atmosphère terrestre, en s'affranchissant des aberrations liées à la turbulence de l'air : le 24 avril 1990, la NASA annonça la mise sur orbite du télescope spatial Hubble par la navette spatiale Discovery. Ce nouvel instrument a permis de prendre des clichés d'un point de vue différent, mais également de disposer d'une résolution inédite. Le 6 août 1993, on découvrit que Pluton était recouvert d'une calotte d'azote solide (et non de méthane, comme on l'avait supposé). Le 27 décembre 1999, on effectua la première réparation de Hubble, ce qui participa (entre autres) à la découverte et à la photographie de la première naine brune connue et de planètes « supergéantes » situées en dehors de notre système solaire.

Les sondes servirent aussi à explorer le système solaire : *Galileo* rejoignit le planétoïde Ida le 28 août 1991 et le 29 octobre 1991 passait à proximité de Gaspra; la sonde *Ulysses* survolait le pôle sud du Soleil le 13 septembre 1994 et la capsule de Galileo traversait même le 7 décembre 1995 l'atmosphère de Jupiter : pour la première fois, l'enveloppe d'une planète gazeuse pouvait être étudiée par spectroscopie. **Alan Hale** et **Thomas Bopp** publièrent la découverte, au voisinage de la trajectoire de Jupiter, de la comète qui porte leur nom, le 22 juillet 1995. En mars 1997, cette comète s'illumina d'un éclat de -1^m (soit 130 fois l'éclat de la comète de Halley). Des indices (contestés) de vie extraterrestre auraient été décelés en 1996 dans l'Antarctique sur la météorite ALH 84001 (âge estimé à 3,6 milliards d'années) qui proviendrait de la planète Mars. Avec les débuts de l'exploration spatiale dans la seconde moitié du XX^e siècle, l'astronomie a donc pu approcher certains de ses objets d'étude par investigation directe dans notre système solaire. Non moins important aura été l'affranchissement des limitations liées à l'atmosphère terrestre : grâce aux observatoires satellisés, l'astronomie ultraviolette, l'astronomie des rayons X et l'astronomie de l'infrarouge ont permis d'explorer de nouvelles bandes spectrales et ont par là ouvert de nouvelles fenêtres sur l'Univers. Avec l'étude des neutrinos du Soleil et de la supernova 1987A, avec l'observation de particules grâce au rayonnement cosmique et l'élaboration de détecteurs d'ondes gravitationnelles,

l'astronomie a pu étendre son champ d'investigation au-delà du rayonnement électromagnétique traditionnel. Simultanément, de nouvelles possibilités d'observation se sont présentées pour l'astronomie optique avec des instruments comme le télescope spatial Hubble ou le « Very Large Telescope ».

11) Découverte de planètes exogènes (ou exoplanètes)

Avec la découverte d'astres qui ne sont pas des étoiles en dehors de notre système solaire, l'astronomie accomplit un grand pas dans la connaissance des exoplanètes : le 12 décembre 1984, Mc Carthy fut le premier à annoncer la découverte d'un tel astre par infrarouges : il l'identifia comme une « naine brune » proche de l'étoile Van Briesbroeck 8 (éloignement de 21 années-lumière, avec une masse de 30 à 80 fois celle de Jupiter). Au milieu des années 1990, on découvrit pour la première fois des exoplanètes, c'est-à-dire des planètes situées en dehors du système solaire, d'abord orbitant autour d'un pulsar, puis en 1995 autour d'une étoile de la séquence principale. Depuis, le nombre d'exoplanètes découvertes croît régulièrement.

12) Gerard Peter Kuiper (1905-1973)

Gerard Peter Kuiper, né **Gerrit Pieter Kuiper** le 7 décembre 1905 à Harenkarspel aux Pays-Bas et mort le 23 décembre 1973 à Mexico, est un astronome néerlandais puis américain. Né et formé aux Pays-Bas, il arriva aux États-Unis en 1933 et devint citoyen américain en 1937. Il fut le directeur des observatoires Yerkes et McDonald. Il découvrit deux autres satellites dans le système solaire, Miranda, une lune d'Uranus (1948), et Néréide, une lune de Neptune (1949).



Gerard Kuiper

Il suggéra également l'existence d'une ceinture d'astéroïdes en dehors de l'orbite de Neptune, appelée à présent la ceinture de Kuiper, ce qui fut confirmé par la suite.

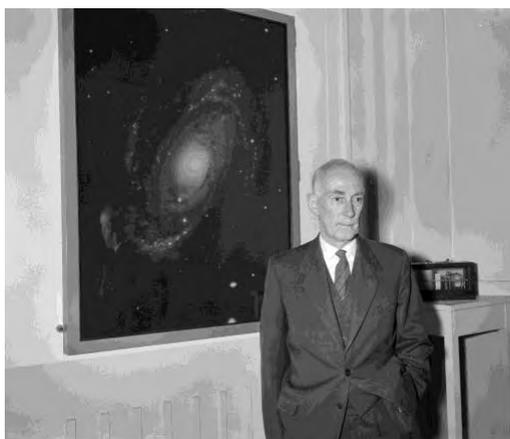
Il mit en évidence la présence de méthane dans l'atmosphère du satellite de Titan en 1944 et du dioxyde de carbone dans celle de Mars en 1947. Il participa également à l'identification du spectre en absorption de la glace d'eau dans les calottes polaires de Mars et des anneaux de Saturne. En 1959 il reçut la Maîtrise de conférences Henry Norris Russell de la Société américaine d'astronomie. Dans les années 1960, il aida l'identification du site d'atterrissage sur la Lune du programme Apollo. Il a découvert des étoiles binaires qu'on identifie sous *Kuiper numbers* ou *KUI 79*.

En mémoire de Kuiper

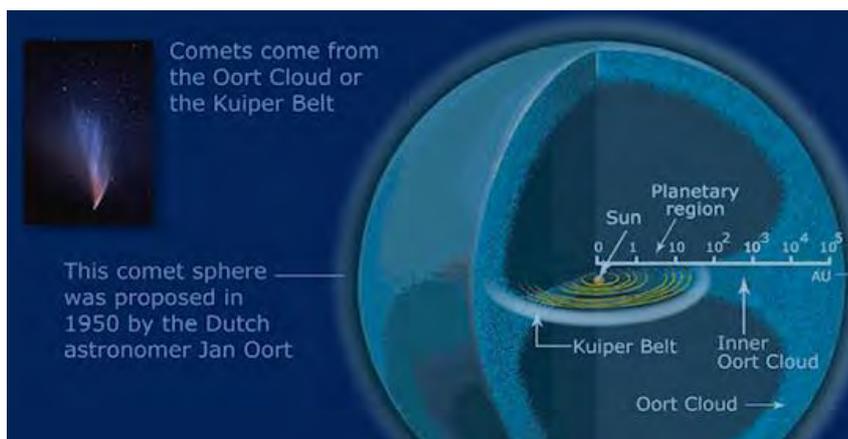
Plusieurs cratères, sur la Lune (autrefois appelé Bonpland E), sur Mars et sur Mercure et un astéroïde (1776) Kuiper, furent nommés en son honneur. C'est l'un des premiers à faire des observations à bord d'un avion Convair 990, qu'on appellera "*Kuiper Airborne Observatory*". L'avion est équipé d'un télescope de type Cassegrain.

13) Jan Hendrik Oort (1900-1992)

Jan Hendrik Oort (28 avril 1900, Franeker, Pays-Bas – 5 novembre 1992, Wassenaar, Pays-Bas) est un astronome néerlandais. Il fut le directeur de l'observatoire de Leyde de 1945 à 1970, il mena de nombreuses recherches sur notre galaxie. Après avoir mis en évidence sa rotation différentielle (1927), il s'attacha à déterminer sa masse, par l'étude des mouvements des étoiles et leur distribution dans l'espace (1932) ; il put ainsi établir sa structure en spirale et la durée de sa révolution. Il développa, à partir de 1950, la théorie – aujourd'hui universellement admise – selon laquelle il existerait, à des distances du Soleil comprises entre 40 000 et 100 000 unités astronomiques, une vaste concentration de comètes (nuage d'Oort). Certaines de ces comètes quittent parfois ce « nuage » pour prendre une orbite dont le plan peut être différent de celui de l'écliptique. Il est fait membre étranger de la Royal Society en 1959. Sa personnalité et l'importance de ses travaux lui permirent de constituer autour de lui une équipe prestigieuse, notamment en radioastronomie, connue sous le nom d'« École de Leyde ». Il fut président de l'Union astronomique internationale (1958—1961) et fut admis en 1953 à l'Académie des sciences américaine, comme membre associé étranger. L'astéroïde (1691) Oort a été nommé en son honneur.



Jan Oort



Le nuage de Oort

Distinctions et récompenses

- 1942 : Médaille Bruce
- 1946 : Médaille d'or de la Royal Astronomical Society
- 1951 : Henry Norris Russell Lectureship
- 1984 : Prix Balzan pour l'astrophysique

14) Stephen Hawking (1942-2018)

Stephen William Hawking né le 8 janvier 1942 à Oxford, est un physicien théoricien et cosmologiste britannique. Stephen Hawking est professeur de mathématiques à l'université de Cambridge de 1980 à 2009, membre du Gonville and Caius College, Cambridge et chercheur distingué du Perimeter Institute for Theoretical Physics. Il est connu pour ses contributions dans les domaines de la cosmologie et la gravité quantique, en particulier dans le cadre des trous noirs. Son succès est également lié à ses ouvrages de vulgarisation scientifique dans lesquels il discute de ses propres théories et de la cosmologie en général, comme le best-seller *Une brève histoire du temps* (titre originel : *A Brief History of Time*), qui est resté sur la liste des records des best-sellers du *Sunday Times* pendant 237 semaines consécutives. Hawking souffre d'une forme rare, de début précoce et d'évolution lente, de sclérose latérale amyotrophique (SLA) ; sa maladie a progressé au fil des ans et l'a laissé presque complètement paralysé.

La clé des principaux travaux scientifiques de Stephen Hawking à ce jour est fondée, en collaboration avec Roger Penrose, sur l'élaboration des théorèmes des singularités dans le cadre de la relativité générale, et la prédiction théorique que les trous noirs devraient émettre des radiations, aujourd'hui connues sous le nom de radiations de Hawking (ou parfois radiations de Bekenstein-Hawking). C'est un physicien théoricien de renommée mondiale dont la carrière scientifique s'étend sur plus de 40 ans. Ses livres et ses apparitions publiques ont fait de lui une célébrité universitaire. Il est membre honoraire de la Royal Society of Arts et membre à vie de l'Académie pontificale des sciences.

Il est le fils du Dr Frank Hawking (1905-1986), un chercheur biologiste, et d'Isobel Hawking (1915-2013), une militante politique. Il a deux jeunes sœurs, Marie et Philippa et un frère adoptif, Edward. Hawking a toujours été intéressé par la science. Il s'inscrit à l'université d'Oxford, avec l'intention d'étudier les mathématiques, bien que son père eût préféré qu'il aille en médecine. Étant donné que les mathématiques n'étaient pas proposées, Hawking choisit alors la physique. Ses intérêts au cours de cette période sont la thermodynamique, la relativité et la mécanique quantique. Son professeur de physique, Robert Berman, déclara plus tard dans le *New York Times Magazine* : « Il est uniquement nécessaire pour lui de savoir que quelque chose peut être fait, et il peut alors le faire sans chercher à voir comment d'autres personnes l'ont fait. [...] Il n'a pas eu un grand nombre de livres, et il n'a pas pris de notes. Bien entendu, son esprit est complètement différent de ceux de ses contemporains ». Hawking arriva alors à un examen final d'évaluation à la frontière entre la première et la seconde classe d'honneur, un examen oral. Berman a dit de l'examen oral : « Et bien sûr, les examinateurs ont été assez intelligents pour réaliser qu'ils parlaient à quelqu'un de plus intelligent que la plupart d'entre eux ».



Photos de Stephen Hawking

Après avoir obtenu son diplôme B.A. à Oxford en 1962, il est resté pour étudier l'astronomie. Il a décidé d'arrêter quand il trouva que l'étude des taches solaires ne l'attirait pas et qu'il était plus intéressé par la théorie que par l'observation. Il a quitté Oxford, avec les honneurs, pour Trinity Hall où il a participé à l'étude de l'astronomie théorique et la cosmologie théorique. Presque dès son arrivée à Cambridge, il a commencé à développer les symptômes de la sclérose latérale amyotrophique (appelée familièrement aux États-Unis la maladie de Lou Gehrig et en Œil la maladie de Charcot), une maladie des neurones moteurs qui lui a enlevé presque tout contrôle neuromusculaire. Au cours de ses deux premières années à Cambridge, il ne s'est pas distingué, mais après la stabilisation de sa maladie et avec l'aide de son tuteur de doctorat, William Dennis Sciama, il est retourné travailler sur sa thèse de doctorat. Il a révélé qu'il ne voyait pas beaucoup l'intérêt d'obtenir un doctorat s'il devait mourir bientôt. Hawking a déclaré plus tard que le véritable tournant a été son mariage avec Jane Wilde en 1965, une étudiante en linguistique. Après avoir obtenu son doctorat, Stephen est devenu chercheur à Gonville and Caius College (Cambridge). L'étude des singularités, concept physique et astronomique récent, permet au chercheur de développer différentes théories, qui le mèneront plus tard du Big Bang aux trous noirs. Hawking a été l'un des plus jeunes membres élus de la Royal Society en 1974, a été fait commandeur de l'ordre de l'Empire britannique en 1982, et est devenu Compagnon d'Honneur en 1989. Hawking est un membre du Conseil des auteurs de *The Bulletin of the Atomic Scientists*.

Les travaux de Hawking ont été réalisés en dépit de l'aggravation de la paralysie causée par la SLA. En 1974, il est devenu incapable de se nourrir ou de sortir du lit par lui-même, tandis que son élocution était fortement altérée par sa maladie, de sorte que seules les personnes le connaissant bien pouvaient encore le comprendre. En 1985, il a contracté une pneumonie et a dû subir une trachéotomie pour mieux respirer, ce

qui l'a rendu définitivement incapable de parler. Walt Woltoz, un informaticien de Californie, a construit un dispositif permettant à Hawking d'écrire sur un ordinateur avec un commutateur dans sa main, tandis qu'un synthétiseur vocal parle pour lui, lisant ce qu'il vient de taper. Ayant perdu l'usage de ses mains, il utilise depuis 2001 les contractions des muscles de sa joue détectées par un capteur infrarouge fixé à une branche de ses lunettes, pouvant ainsi sélectionner les lettres une par une sur un clavier virtuel d'une tablette dont un curseur balaie en permanence l'alphabet, puis sélectionner des mots grâce à un algorithme prédictif. Ce système lui permet d'exprimer cinq mots à la minute et de donner des cours à l'université de Cambridge jusqu'en 2009. Face à l'aggravation de son état, Intel met au point depuis une nouvelle interface de contrôle basée sur la reconnaissance faciale des mouvements de ses lèvres et sourcils. La nécessité de toujours peser ses mots (au risque d'en effacer d'autres dans le vocabulaire automatique) n'a pas nui à son style d'une grande limpidité, en particulier dans son livre *Une brève histoire du temps* (1988). En premier lieu, Roger Penrose et Stephen Hawking construisent la structure mathématique répondant à la question d'une singularité comme origine de l'Univers. Ensuite, à partir des années 1970, Hawking approfondit ses recherches sur les densités infinies locales, et ses études sur les trous noirs ont fait progresser bien d'autres domaines. Enfin, la *théorie du tout*, visant à unifier les quatre forces physiques, est au centre des recherches actuelles de Hawking. Le but est de démontrer que l'Univers peut être décrit par un modèle mathématique stable, déterminé par les lois physiques connues, en vertu du principe de croissance finie mais non bornée, modèle auquel Hawking a donné beaucoup de crédit.

Son handicap lourd ne saurait expliquer le grand succès de ses recherches ; Hawking a cherché à vulgariser son travail, et son livre *Une brève histoire du temps* est l'un des plus grands succès de la littérature scientifique. En 2001, paraît son deuxième ouvrage, *L'Univers dans une coquille de noix* qui est l'exposé du dernier état de ses réflexions, en abordant la supergravité et la supersymétrie, la théorie quantique et théorie-M, l'holographie et la dualité, la théorie des supercordes et des p-branes, etc. Il s'interroge également sur la possibilité de voyager dans le temps et sur l'existence d'univers multiples.

Recherches

Les principaux domaines de recherches de Hawking sont la cosmologie et la gravité quantique. À la fin des années 1960, lui et son ami et collègue de Cambridge, Roger Penrose, ont appliqué un nouveau modèle mathématique complexe, qu'ils ont créé à partir de la théorie d'Albert Einstein sur la relativité générale. Cela a conduit Hawking à prouver en 1970 le premier de nombreux théorèmes sur les singularités, tels les théorèmes capables de fournir un ensemble de conditions suffisantes à l'existence d'une singularité dans l'espace-temps. Ce travail a montré que, loin d'être une curiosité mathématique qui ne figure que dans des cas particuliers, les singularités sont assez génériques dans la relativité générale.

Résumé succinct de ses recherches

La radiation Hawking

Au milieu des années 1960, alors qu'il poursuit ses études de physicien en vue d'obtenir son doctorat, Hawking démontre que la théorie de la relativité générale d'Einstein implique que l'espace et le temps ont eu un commencement, le Big Bang, et une fin, les trous noirs. Ces conclusions le conduisent à découvrir dès 1963 que les trous noirs ne seraient pas si noirs que cela, mais qu'ils seraient capables d'émettre un rayonnement, le rayonnement Hawking. La réaction initiale de la communauté scientifique ne fut pas très positive. La *radiation Hawking* correspond à un rayonnement de corps noir. Elle est émise dans toutes les directions et conduit à deux conclusions :

- d'une part, ce rayonnement renverse la définition même du trou noir puisque dans ce cas-ci, il libère des particules dans l'espace ;
- d'autre part, ce phénomène conduit finalement à son évaporation quantique et sa disparition dans un intense flash d'énergie pure.

Les mini trous noirs

En 1971, Hawking avance l'hypothèse que le phénomène du Big Bang aurait dispersé dans l'espace des micro trous noirs d'une masse d'environ 10^9 tonnes et de la taille d'un proton ainsi que des trous noirs plus massifs et de la taille d'une montagne. Des trous noirs aussi massifs que dix millions de masses solaires pourraient également résider au centre des galaxies, ce qui expliquerait l'intense énergie émise par les radiogalaxies et les quasars.

L'entropie des trous noirs

Mais à force de calculs, il découvre également qu'en appliquant les lois de la physique quantique à la cosmologie, il peut déterminer la dimension des singularités, ces « points de densité et de courbure d'espace-temps infinis » prédits par la relativité générale et que l'on ne peut pas traiter mathématiquement. Il réalise que l'horizon des événements des trous noirs (la limite sous laquelle rien ne peut s'échapper) ne peut pas diminuer lorsqu'il attire de la matière. Si on prend une analogie avec la thermodynamique dit-il, c'est exactement ce que dit la deuxième loi de la thermodynamique : « dans un système isolé, l'entropie (son degré de désordre) ne peut pas décroître ». D'autres disent plus simplement que le chaos augmente. Dans une singularité, le système thermodynamique est totalement désordonné car le tenseur de Weyl est dominant, il tend même vers l'infini, ce qui permet à Hawking de conclure que son entropie est maximale. Mais son confrère, Jacob Bekenstein de l'université de Princeton lui répond qu'il ne s'agit pas seulement d'une analogie, l'horizon des événements *représente* la mesure de l'entropie du trou noir. Il s'ensuit un échange d'arguments par articles interposés jusqu'à ce qu'Hawking lui fasse remarquer que si un trou noir présente une entropie, il a donc aussi une température, et s'il a une température, il doit émettre un rayonnement, mais que par définition un trou noir n'émet rien, aucun rayonnement. C'est alors qu'Hawking va plus loin dans ses calculs et découvre qu'un trou noir peut finalement émettre un rayonnement de manière constante. Il pense tout d'abord avoir fait une erreur de calcul et garde ses travaux pour lui : « Je craignais, dit-il, que Bekenstein ne le découvre, et ne l'utilise comme argument pour appuyer sa propre théorie ». Finalement Hawking le convainc de l'exactitude de son résultat et qu'on peut utiliser la physique quantique pour expliquer le mécanisme de rayonnement qui porte aujourd'hui son nom. Bekenstein s'y plie à contrecœur, disant que c'est « fondamentalement exact mais d'une manière à laquelle je ne m'attendais certainement pas ». Plus tard, Hawking aborde cette question avec moult détails dans la première version de son livre « Trous noirs et bébés univers », puis il supprime ce passage et se contente d'indiquer que Jacob Bekenstein lui a fait une « suggestion cruciale ». On lui attribue la volonté de tourner la théorie de Bekenstein en dérision (en la traitant de « scandaleuse » ou d'« insensée ») pour accroître la valeur de ses propres résultats. Même son directeur de thèse, le D^r Dennis Sciama, juge « son ton méprisant face au travail de Bekenstein ». Finalement tout le travail de son concurrent est oublié.

La perte d'information dans un trou noir

Si un trou noir est capable de rayonner, ce n'est pas pour autant que cette radiation contient une information sur le trou noir. La particule émise peut être quelconque tant que sa longueur d'onde est supérieure au quart de la circonférence du trou noir (celle de l'horizon des événements). En fait, en absorbant tout jusqu'à la lumière, le trou noir devient une censure cosmique comme le disait Penrose, ne libérant aucune information sur ses propriétés. Du moins Hawking le pensait à l'époque. Mais ceci n'étant qu'une solution théorique tirée de ses calculs, il fait le pari avec Kip Thorne contre John Preskill que les trous noirs constituent la phase terminale de l'univers et emprisonnent à jamais tout ce qui passe à leur proximité sans libérer la moindre information. Le 21 juillet 2004, il admet avoir perdu son pari et admet, avec Leonard Susskind, que l'information apparemment captive pourrait rester concentrée sur l'horizon d'un trou noir, donc sur une surface, par analogie avec un hologramme qui concentre une information sur une image à trois dimensions, également sur une surface.

Les trous de ver

Hawking et Einstein décrivent également les « trous de ver » (*wormholes*), des fluctuations quantiques dans l'espace-temps qui, à l'image des tunnels, permettent de prendre des raccourcis dans l'espace-temps. Cette théorie est rapidement reprise et vulgarisée par les médias, bien que rien ne prouve que ces trous de ver existent et que personne ne soit capable de dire si ces entités qui ont une échelle subatomique peuvent se maintenir à l'échelle macroscopique sans s'effondrer en raison de leur instabilité intrinsèque.

La flèche du temps et l'univers sans bord

En 1983, Hartle et Hawking abordent également la question de la *flèche du temps*. Hawking propose (ceci n'étant pas déduit d'un temps imaginaire pour éviter l'écueil des infinis et des instants zéro asymptotiques et inatteignables. Hawking explique que c'est la seule manière d'entrevoir le commencement de l'univers d'une manière totalement déterminée par les seules lois de la science, sous-entendant que le « Créateur » n'y joue aucun rôle dominant.

Nouvelle théorie sur les trous noirs

Stephen Hawking est sur le devant de la scène en juillet 2004 en présentant une nouvelle théorie sur les trous noirs qui va à l'encontre de sa propre ancienne théorie, perdant ainsi un pari que lui et Kip Thorne avaient fait avec John Preskill, un physicien des particules. Classiquement, on peut montrer que l'information qui passe par l'horizon d'un trou noir est perdue pour notre univers. Ce fait est connu sous le nom de théorème de calvitie. Le problème avec ce théorème est qu'il implique que le trou noir émet les mêmes radiations quel que soit ce qui y rentre. Ainsi, si un état pur quantique est jeté dans un trou noir, un état mélangé en ressortira. Ceci va à l'encontre des règles de la mécanique quantique et est connu sous le nom de paradoxe de l'information perdue des trous noirs. Hawking avait auparavant spéculé que la singularité au centre du trou noir pouvait former un pont vers un « bébé univers » dans lequel l'information perdue pouvait passer ; de telles théories sont très populaires dans la science-fiction. Mais d'après la nouvelle idée de Hawking, présentée à la 17^e Conférence internationale sur la relativité générale et la gravitation, le 21 juillet 2004 à Dublin, les trous noirs finissent par transmettre, de manière désordonnée, l'information de toute la matière qu'ils avalent. Ayant conclu que l'information est conservée, Hawking concède qu'il a perdu son pari, cédant à Preskill son encyclopédie. Toutefois, Thorne reste dubitatif vis-à-vis de la démonstration de Hawking et refuse de contribuer à la récompense. En juillet 2005, l'annonce de Hawking a donné lieu à une publication dans la revue *Physical Review* et largement débattue dans la communauté scientifique. En 2014 Stephen Hawking déclare à la revue *Nature*, après sa conférence à l'Institut Kavli pour la physique théorique à Santa Barbara en Californie : « Il n'y a pas de trou noir... le concept de trou noir est incompatible avec la physique quantique ». « On ne peut rendre compte parfaitement de ces astres curieux tant que nous n'avons pas élaboré une théorie de la gravité unifiée, capable de concilier les lois de la physique quantique des échelles subatomiques avec la relativité générale qui rend compte de l'astronomie ». Actuellement, deux théories sont en confrontation : la théorie des cordes et celle des boucles.

Polémiques et prises de position

- Hawking a affirmé qu'il serait « plus enthousiasmant » que le Large Hadron Collider échoue à trouver le boson de Higgs, dont la découverte est un des objectifs prioritaires, ce qui lui a valu un échange vif avec Peter Higgs, qui avait prédit l'existence de cette particule en 1964. **Il se trouve qu'on a très récemment (2012) démontré l'existence de ce boson !**
- Hawking suscite une controverse lors de la parution en 2011 de son livre *Y a-t-il un grand architecte dans l'univers ?* Il lui est notamment reproché de faire la confusion entre sciences, philosophie et vocabulaire religieux et de présenter la théorie M unifiant gravitation et forces électromagnétiques et nucléaires, comme « celle recherchée en vain par Einstein ».
- Lors d'une interview à la BBC en 2014, au sujet de l'intelligence artificielle, Hawking déclare : « Les formes d'intelligences que nous avons déjà se sont montrées très utiles. Mais je pense que le développement d'une intelligence artificielle complète pourrait mettre fin à la race humaine. Les humains, limités par une lente évolution biologique, ne pourraient pas rivaliser et seraient dépassés ».

Stephen Hawking est exactement le contre-exemple de ce que nous disions de l'astronomie moderne. Ce n'est pas quelqu'un qui travaille dans une organisation nationale ou internationale nécessitant une équipe ou de gros moyens technologiques et/ou financiers. C'est une sorte de génie isolé (beaucoup de ses théories ne sont que des suppositions et non des faits avérés), qui est un brillant intellectuel passionné d'astrophysique et de cosmologie. Il n'a pas besoin de laboratoire ou d'expérimentations pour avancer des hypothèses sur les éléments fondamentaux de l'Univers et la manière dont ils interagissent. C'est un brillantissime scientifique qui émet des hypothèses parfois très complexes et difficiles à appréhender. C'est en même temps un excellent vulgarisateur, comme il le montre dans certains de ses livres. Souvent provocateur, parfois paradoxal vis-à-vis de ses propres affirmations, il n'en est pas moins passionnant ! Si son corps et sa maladie l'ont enfermé dans un état où il communique avec difficulté, son esprit et son cerveau fonctionnent à une vitesse stupéfiante. Il est mort en 2018, à 76 ans.

B) Le XXI^e siècle

1) Inventaire chronologique de certaines découvertes et avancées importantes en astronomie entre 2001 et 2016 :

- 2001 : Le noyau de la comète Borrelly est photographié le 25 septembre 2001 à 8 km de distance par la sonde spatiale Deep Space 1.
- 2002 : L'astronomie est récompensée par le prix Nobel de physique attribué à Riccardo Giacconi pour sa contribution au développement de l'astronomie des rayons X.
Lancement de la mission INTEGRAL (17 octobre).
Première mesure convaincante du décalage vers le rouge gravitationnel à la surface d'une étoile à neutrons (EXO 0748-676).
Première découverte d'un pulsar X anormal extragalactique (PSR J0100-7211, dans le Petit Nuage de Magellan).
- 2003 : Fin de la mission de la sonde Pioneer 10.
Découverte de l'association entre un sursaut gamma (GRB 030329) et une supernova (SN 2003dh), résolvant le mystère de la nature des sursauts gamma.
Lancement du télescope spatial Spitzer (anciennement appelé SIRTf, 25 août).
Fin de la mission Galileo.
La sonde WMAP permet d'affiner le modèle standard de la cosmologie avec une précision inégalée jusqu'alors, et confirme l'existence de la matière noire et de l'énergie noire.
Découverte de l'astéroïde Sedna, objet non cométaire dont l'aphélie est la plus importante (env. 950 UA).
Découverte du premier pulsar double, PSR J0737-3039.
- 2004 : Lancement de la mission Gravity Probe B destinée à tester le principe d'équivalence.
Arrivée de la sonde Cassini-Huygens au voisinage de Saturne (1^{er} juillet).
Voyager 1 atteint le choc terminal, première structure délimitant la frontière entre le système Solaire et le milieu interstellaire (héliopause) et entre dans l'héliogaine.
La sonde Stardust photographie le noyau de la comète Wild 2.
- 2005 : **La sonde Huygens atterrit à la surface de Titan.**
Impact de la sonde Deep Impact sur la comète Tempel 1.
La sonde japonaise Hayabusa parvient à capturer des échantillons de l'astéroïde (25143) Itokawa
Michael E. Brown découvre la planète naine Éris, dont le diamètre dépasse celui de Pluton (ce qui s'est avéré faux en 2015).
- 2006 : **L'étude de la structure et du champ gravitationnel de l'amas de galaxies 1^E0657-56 donne une nouvelle preuve directe de l'existence de la matière noire.**
L'assemblée générale de l'Union Astronomique Internationale redéfinit la notion de planète (il y en a 8) et crée celle de planète naine (3 pour l'instant). Pluton est déchu de la première catégorie au profit de la seconde.
La cosmologie est récompensée par le Prix Nobel de physique, attribué à deux responsables de la mission COBE, John C. Mather et George F. Smoot.
- 2008 : Première mesure du moment cinétique d'un trou noir stellaire, avec GX 339-4 qui s'avère proche d'être un trou noir extrémal.
Découverte d'un quatrième sursauteur gamma mou galactique, SGR J0501+4516
Lancement du *Fermi Gamma-ray Space Telescope* (anciennement GLAST), qui découvre un (RX J0007.0+7303) puis plusieurs pulsars gamma silencieux dans les autres domaines de longueur d'onde à l'instar de PSR J0633+1746 (Geminga).

- **2012 : (2 mai) Première preuve visuelle de l'existence des trous-noirs. L'équipe de Suvi Gezari de l'université Johns Hopkins, utilisant le télescope hawaïen Pan-STARRS 1, publie les images d'un trou noir supermassif à 2,7 millions d'années-lumière en train d'aspirer une géante rouge.**
- **2004 — 2014/2015 Tchouri. L'ESA (Agence spatiale européenne) lance la sonde Rosetta en mars 2004, qui atteindra la comète 67/P Tchourioumov-Guerassimenko en août 2014 (mise en orbite) puis déposera le petit atterrisseur Philæ à la surface de cette comète. [Voir notre document sur le Système Solaire.](#)**
- **2007 – 2011/2016 et... La sonde Dawn de la NASA. Lancée vers la ceinture d'astéroïdes pour se mettre en orbite et étudier successivement l'astéroïde Vesta et la planète naine Cérès. [Voir notre document sur les Planètes Naines.](#)**
- **2006 – 2015-2025. La sonde New Horizons de la NASA : lancée le 19 janvier 2006, est donc la première sonde spatiale à visiter Pluton, bénéficiant en février 2007 de l'assistance gravitationnelle de Jupiter pour arriver au plus près de la planète naine le 14 juillet 2015, après un voyage de 6,4 milliards de kilomètres. Les observations débutent environ cinq mois avant le plus proche passage et devraient continuer environ un mois après. Le survol est toutefois si rapide que seul un hémisphère peut être photographié avec la résolution la plus élevée. L'engin spatial emporte à son bord des instruments d'imagerie, de spectrométrie et d'autres appareils de mesure, afin de déterminer les caractéristiques géologiques et morphologiques de Pluton et de sa lune Charon, mais aussi cartographier les éléments composant leur surface et étudier l'atmosphère de Pluton (composition et taux d'évasion). La mission prévoit également un survol des objets de la ceinture de Kuiper jusqu'en 2025. [Voir notre document sur les Planètes Naines.](#)**
- **Les Rovers MER et MSL sur Mars. Lancés en 2003 par deux sondes spatiales, les deux Rovers MER de 185 kg chacun (Spirit et Opportunity) se sont posés sur la planète Mars pour y rouler, faire des analyses et des photos. Ils étaient initialement prévus pour fonctionner environ 3 mois. Spirit est silencieux depuis juillet 2010 après avoir parcouru 7,7 km. Opportunity, à la date du 22 mars 2016, fonctionne et roule encore (depuis plus de 12 ans !) en fonction des missions qui lui sont assignées. Il a déjà parcouru 42,7 km depuis son atterrissage en janvier 2004. Le Rover MSL de 900 kg, lancé en novembre 2011, il a atterri sur le cratère Gale le 6 août 2012. A ce jour il a parcouru près de 13 km malgré le fait que ses roues aient été assez fortement endommagées. [Voir notre document sur Mars.](#)**

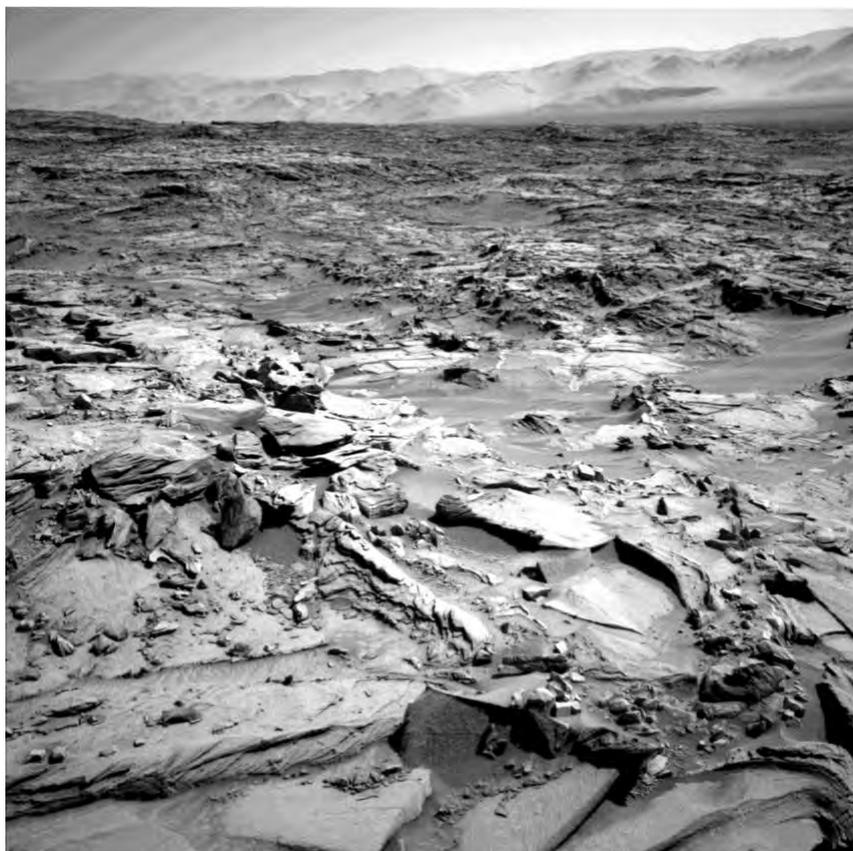


Photo transmise par Curiosity le 24 mars 2016 sur le plateau Nauyflatt

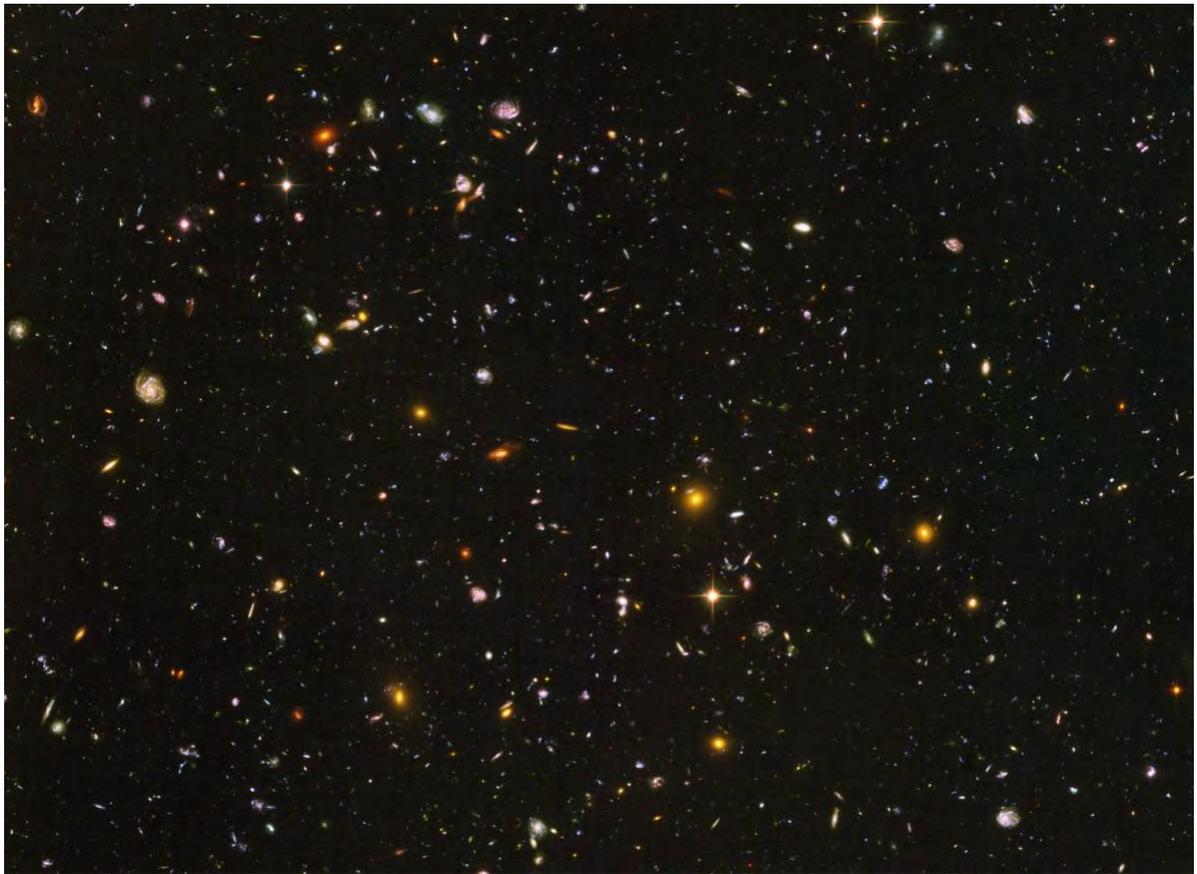
- **La rotation de la surface de Mars.** [Voir Annexe 5.](#)

2) **Nous mettons ici l'accent sur quelques points essentiels, incontournables, dans les découvertes récentes (depuis 120 ans ou moins) qui « révolutionnent » notre connaissance de l'Univers, que ce soit dans le système solaire ou au-delà.**

Il est évident que l'accélération de la science et des technologies, les moyens très importants qui sont mis en œuvre depuis plus d'une cinquantaine d'années nous offrent des centaines, voire des milliers de nouvelles découvertes. Notre façon de voir l'Univers change à une vitesse fulgurante, au gré des recherches et des découvertes. Nous comprenons de mieux en mieux les origines de l'Univers depuis le « Big Bang », même si nous sommes encore loin de tout connaître. D'ailleurs c'est probablement impossible. Chaque nouvelle découverte, si elle répond plus ou moins bien aux questions qu'on se posait, va générer encore plus de questions, de nouvelles interrogations. Cela va stimuler le désir d'en savoir encore plus, nous permettre d'inventer de nouveaux instruments pour faire encore reculer notre part d'ignorance...

Il nous faut aussi parfois essayer de faire cohabiter et rendre compatibles entre elles des théories ou des systèmes de pensée : ainsi, la théorie des quanta (Planck) et celle de la relativité générale (Einstein) sont toutes les deux avérées et prouvées, chacune de leur côté. La première dans l'infiniment petit en étudiant et découvrant des particules de plus en plus petites dont certaines n'ont même pas de masse. La seconde dans le respect des lois de la gravité universelle (Newton et Kepler) mais laissant entrevoir un espace-temps qui peut se courber, en expliquant certains phénomènes par la présence de la matière noire et/ou de l'énergie sombre. De nombreux scientifiques essaient de faire une synthèse entre ces deux monuments de la physique et ils ne sont peut-être pas très loin d'y arriver...

a) **La connaissance de la réalité des galaxies**, pressentie par certains mais finalisée par Hubble (1920). Jusqu'au XIX^e siècle, même si on pressentait l'existence possible des galaxies, on les appelait encore des nébuleuses, faute d'avoir des télescopes suffisamment puissants pour en découvrir les formes. C'est désormais chose faite et nous savons qu'il y a environ 200 milliards de galaxies dans notre Univers. [Consultez notre document sur le « Système Solaire ».](#)



Des centaines, des milliers de galaxies dans cette image du ciel profond réalisée par le télescope Hubble

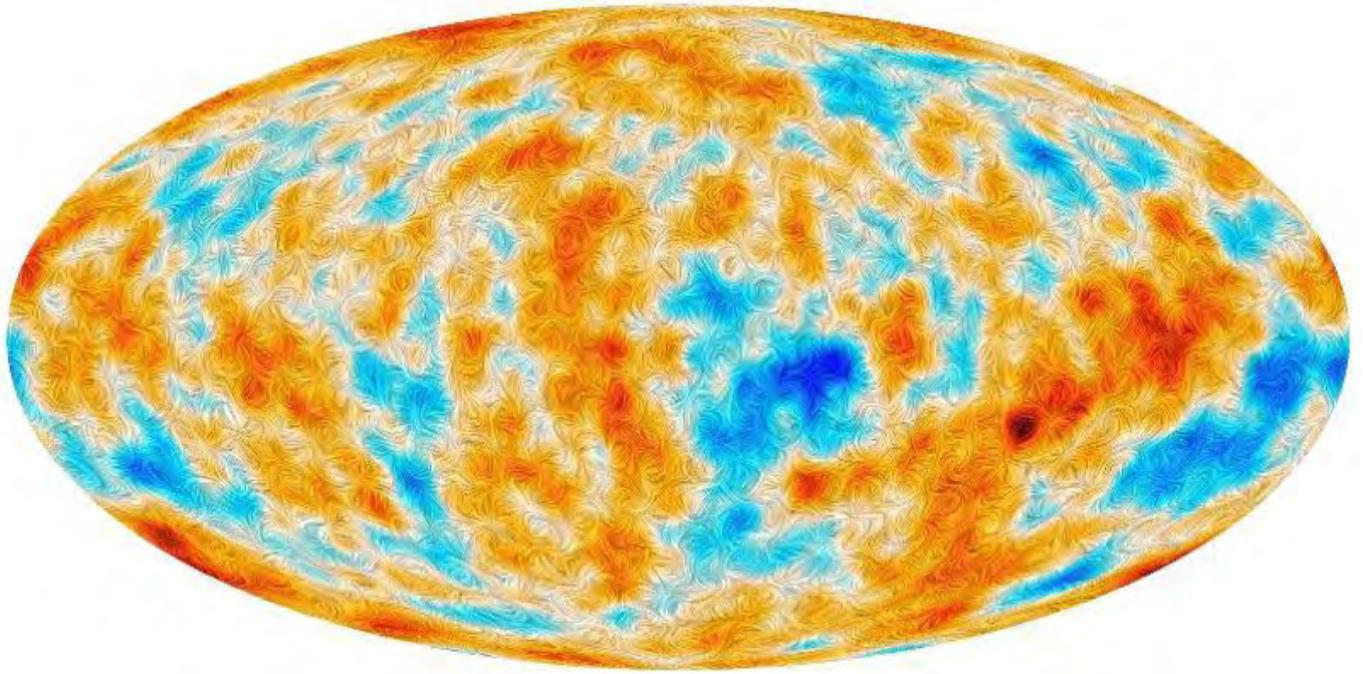
b) **La théorie des quanta de Max Planck** (vers 1900) – Prix Nobel de physique 1918

c) **La relativité, restreinte puis généralisée d'Albert Einstein** (1905-1915) – Prix Nobel de physique 1921

d) **La ceinture de Kuiper** et les planètes naines – **Le nuage de Oort** et les comètes. [Consultez notre document sur le « Système Solaire »](#).

e) **La conquête spatiale au sens large**, avec toutes les avancées de l'astronomie qui lui sont dues. Spoutnik 1 (octobre 1957) – Gagarine, le 1^{er} homme dans l'espace (avril 1961) – Les hommes sur la Lune : Missions Apollo (juillet 1969 – décembre 1972). [Consultez notre document sur la « Conquête Spatiale »](#).

f) **La découverte du « fond diffus cosmologique »**. Le télescope spatial Planck. [Consultez notre document sur le « Système Solaire »](#).



La carte ci-dessus représente la polarisation du rayonnement fossile, première lumière émise par l'Univers il y a 13,8 milliards d'années. Les taches de couleurs correspondent aux infimes variations de température de ce rayonnement très froid (- 270 °C environ) dans lequel nous baignons. Cette information était déjà connue (de façon presque aussi précise) depuis 2013. L'information supplémentaire apportée par la polarisation est l'ensemble de petites lignes, qui sont comme de petites empreintes digitales.

g) **Les sondes et/ou atterrisseurs planétaires** – vers : Mars, Astéroïdes, Jupiter, Saturne, Pluton. Les sondes et les « rover » qui roulent sur Mars et analysent des échantillons nous apprennent beaucoup sur cette planète. Les sondes Galiléo (Jupiter) et Cassini-Huygens (Saturne) nous ont fait découvrir d'innombrables détails sur chacune de ces planètes, leurs satellites, leurs anneaux, leur composition chimique, etc. La sonde New Horizons qui a survolé Pluton le 14 juillet 2015 a fait considérablement progresser la connaissance que nous avons de cette planète naine et nous a envoyé des photos saisissantes.

Consultez nos documents sur chacune des planètes concernées (Mars, Système solaire, Jupiter, Saturne, Planètes naines).

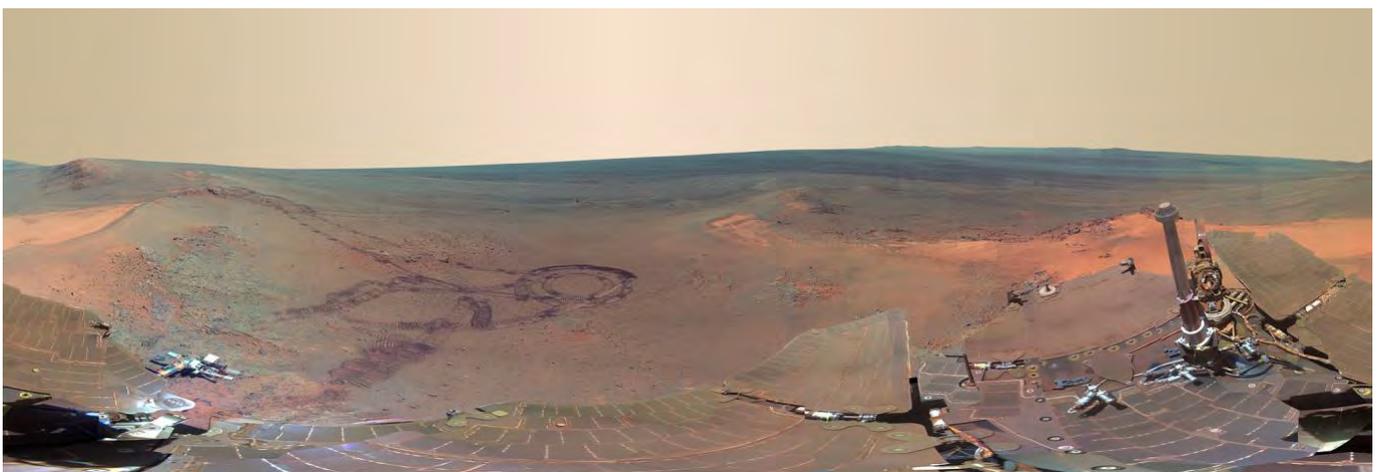
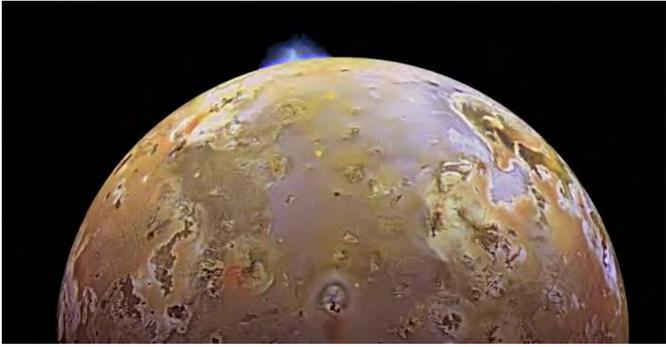


Photo du Rover Opportunity sur Mars (2011-2012)



Io, satellite de Jupiter qui a une forte activité volcanique

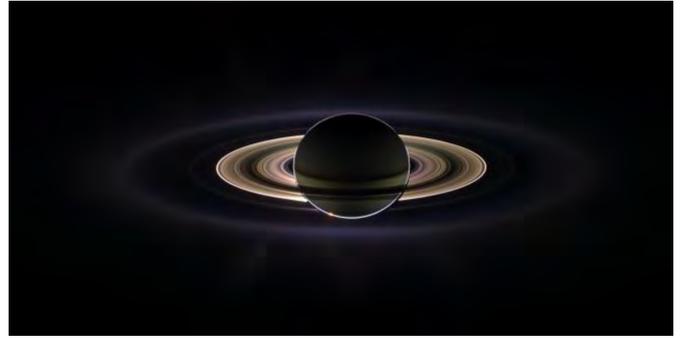


Photo de Saturne prise par la sonde Cassini

h) Une meilleure connaissance de Mars : structure, histoire, présence d'eau, le pivotement de la surface. **Consultez l'Annexe V ainsi que notre document sur « Mars ».**

i) Les télescopes orbitaux et les « gros » télescopes terrestres. **Consultez notre document sur les « Instruments de l'astronomie ».**

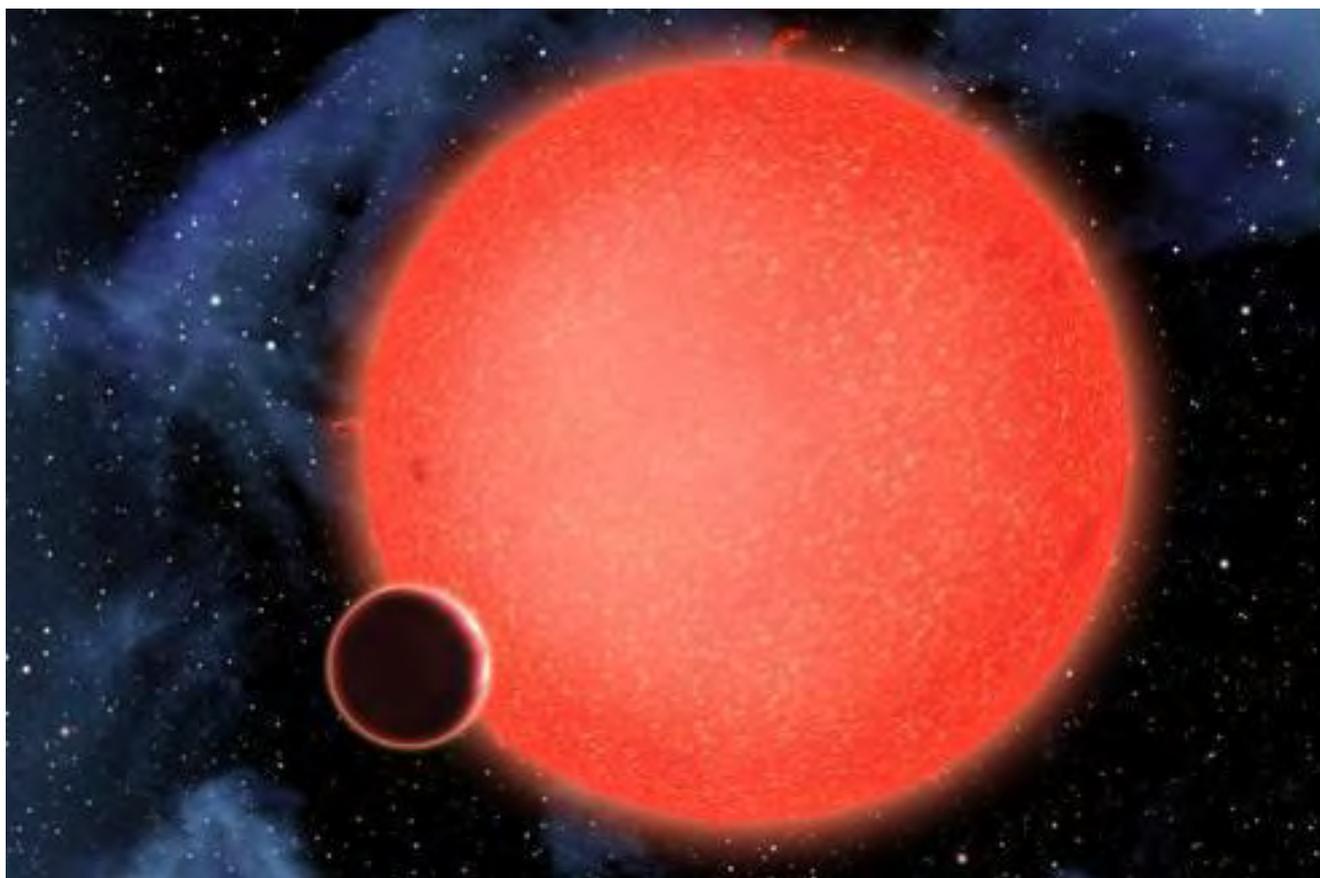
j) **Les exoplanètes (1995-)** Voyez ci-dessous et **consultez également notre document sur le « Système Solaire ».**

Une exoplanète est une planète qui tourne autour d'une étoile autre que le soleil. Il faut savoir que, depuis la découverte de la première exoplanète en 1995, le compte va en grandissant. On en découvre depuis la terre grâce aux puissants télescopes comme ceux du VLT au Chili et d'autres, mais surtout grâce au télescope spatial Kepler, qui a pour mission essentielle de trouver ces objets. Pour l'instant Kepler cherche essentiellement dans la Voie Lactée, plus proche de nous que les régions extragalactiques, et même essentiellement vers les constellations de la Lyre, du Cygne et de leurs alentours.

Pour l'instant, on a trouvé environ 5.000 exoplanètes, dont plus de 2.000 sont certifiées. Ce n'est qu'un début ! N'oublions pas qu'il y a environ 150 à 200 milliards d'étoiles dans notre Voie Lactée. Sachant qu'une étoile a environ (en moyenne) 30 à 40% de chances d'avoir une ou plusieurs planète(s), cela donne un potentiel de 50 milliards de planètes, rien que dans notre Galaxie. Or il y a entre 100 et 200 milliards de galaxies dans **l'Univers connu**... Les chiffres potentiels donnent le vertige.

Récemment, le télescope spatial Hubble a découvert un nouveau type d'exoplanète, encore inconnu à ce jour :

Le télescope Hubble révèle un nouveau type de planète



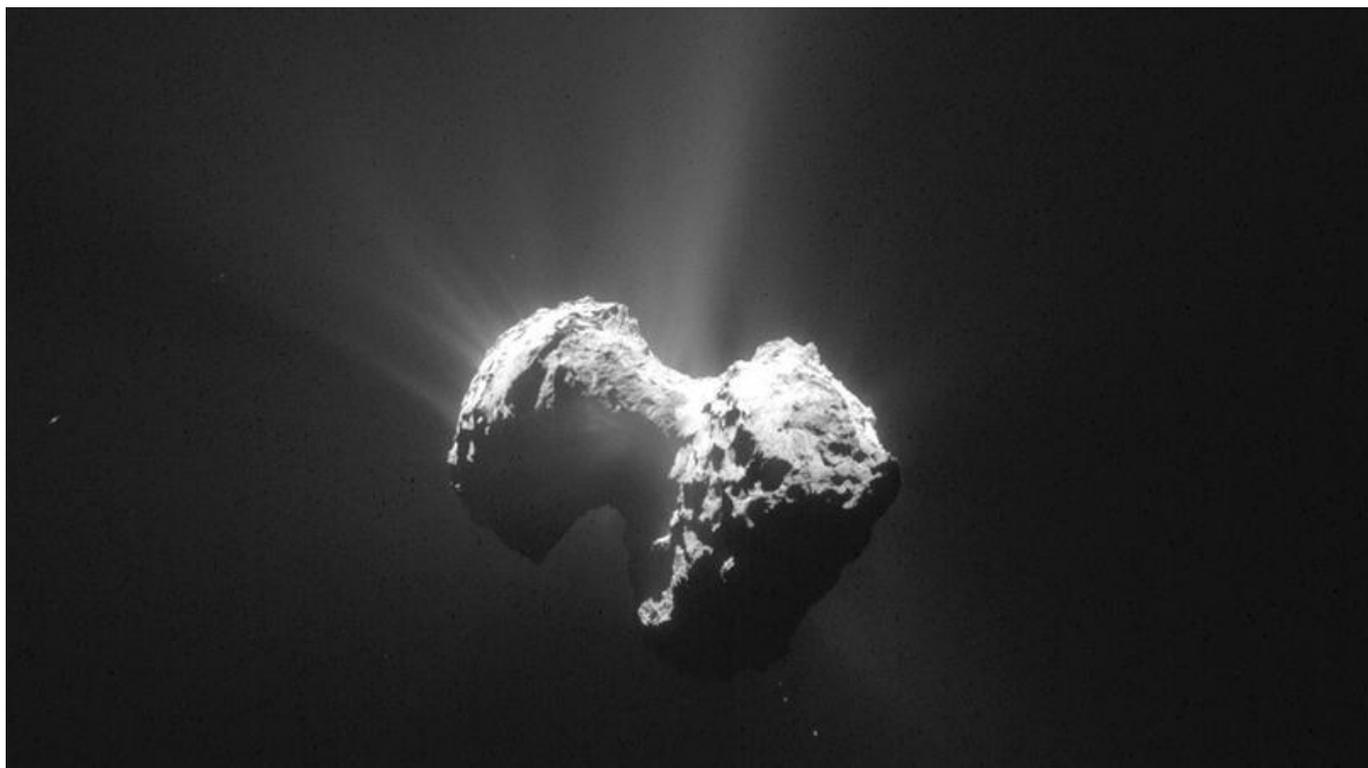
La température qui règne à la surface de ce nouveau monde serait de 232° C

Située à 40 années lumière de la Terre, l'exoplanète GJ1214b est composée essentiellement d'eau. De l'eau dans tous ses états ! Découverte en 2009 grâce au télescope spatial Hubble, l'exoplanète GJ1214b, située à seulement 40 années lumière de la Terre, ressemble à une immense piscine, un *waterworld* disent les Anglo-saxons. Mais il ne ferait pas bon s'y baigner... Dans une étude à paraître dans la revue *Astrophysical Journal*, l'astronome Zachory Berta, du centre d'astrophysique de Harvard, aux États-Unis, révèle en effet que la température qui règne à la surface de ce nouveau monde serait de 232° C. «Les températures et les hautes pressions pourraient former des matières exotiques comme de la «glace chaude», ou de «l'eau superfluide», substances qui sont complètement étrangères à notre expérience quotidienne», explique le chercheur. Aucune chance donc d'y trouver la moindre trace de vie extraterrestre.

Une atmosphère épaisse et humide

Ces conditions extrêmes s'expliquent par la proximité de GJ1214b par rapport à son étoile : à peine 2 millions de km, soit 70 fois moins que la distance entre la Terre et le Soleil. Le diamètre de cette «super-Terre», située dans la constellation du Serpenteaire est 2,7 fois supérieur à celui de notre planète et sa masse est sept fois plus élevée. Sa densité est donc deux fois moins importante, ce qui suggère qu'elle contient plus d'eau et moins de roche. En fait, «GJ1214b ne ressemble à aucune planète que nous connaissons», conclut Zachory Berta qui a analysé les données transmises par la caméra à champ large (WFC3) de Hubble en collaboration avec d'autres scientifiques comme Derek Homeier, de l'École normale supérieure de Lyon, pendant que GJ1214b passait devant son étoile. La lumière de cette dernière étant alors filtrée par celle de la planète, les chercheurs en ont déduit la nature des composés présents dans son atmosphère. Selon M. Berta, ces mesures «ont fait pencher la balance en faveur d'une atmosphère humide». Jusqu'à présent les astronomes avaient répertorié trois types de planètes : les planètes telluriques ou rocheuses, à l'image de la Terre, Mercure, Vénus et Mars, les géantes gazeuses (Jupiter, Saturne ainsi que la majorité des exoplanètes détectées à ce jour) et enfin les géantes glacées comme Uranus et Neptune. GJ1214b est bel et bien une planète d'un genre tout-à-fait nouveau.

k) **Les études sur les comètes** : Tchouri. Exploit extraordinaire de l'ESA de lancer une sonde parcourir plus de 650 millions de kilomètres, de réussir à se mettre en orbite autour d'une comète de 5 x 3 km (donc à très faible gravité) et d'y poser un engin. Notre connaissance de la composition des comètes a fortement progressé depuis cette prouesse technologique. [Consultez notre document sur le « Système Solaire »](#).



La comète 67/P Tchourioumov-Guerassimenko (appelée familièrement Tchouri). Photo prise par la sonde Rosetta en 2015

l) **La découverte (prouvée en 2006) de la matière noire**, pressentie par Oort en 1949. [Consultez notre document sur le « Système Solaire »](#).

m) **Laniakéa** (« super-amas » de 100.000 galaxies qui vivent ensemble). Voir ci-dessous et [consultez notre document sur le « Système Solaire »](#).

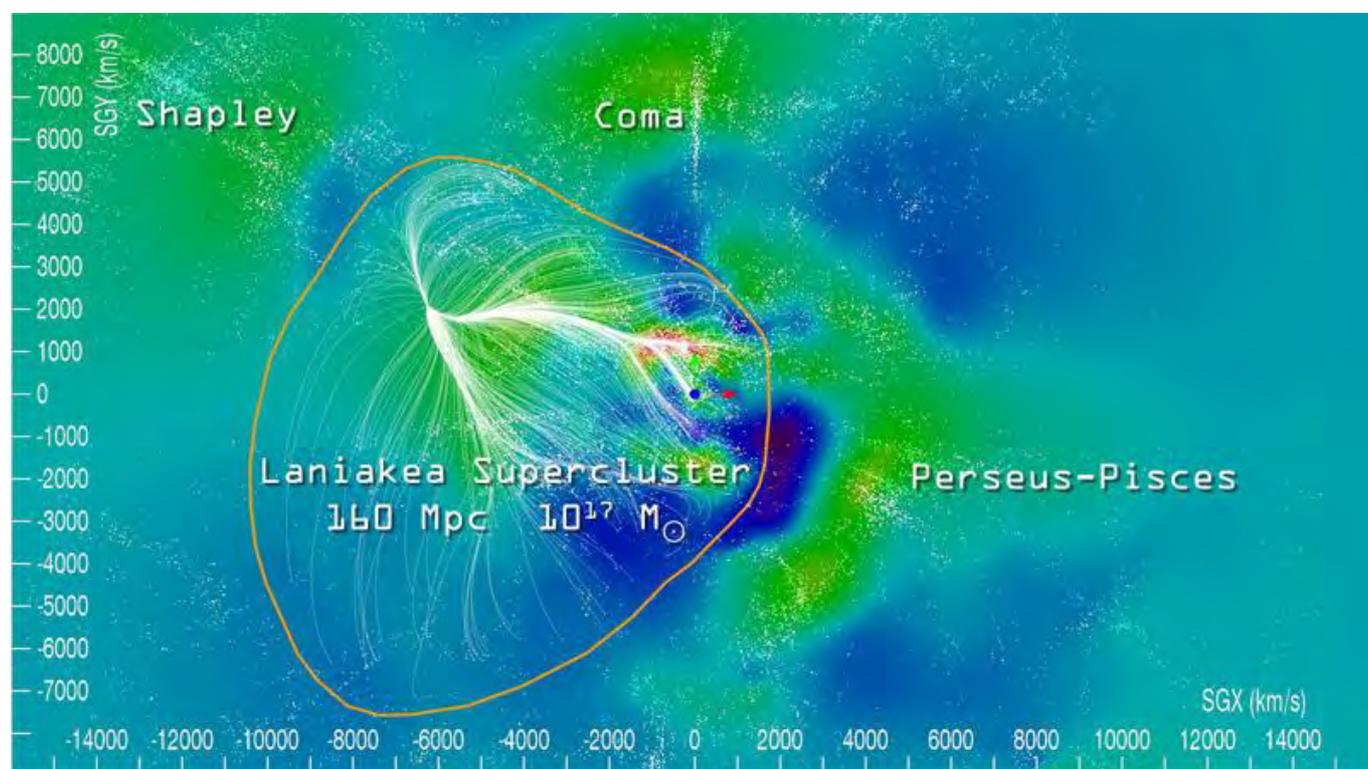
11 septembre 2014

Laniakea – Une tranche du Superamas Laniakea dans le plan équatorial supergalactique. Les nuances de couleur représentent des valeurs de densité de matière avec en rouge la haute densité et en bleu les vides. Les galaxies individuelles sont montrées comme des points blancs. On observe en blanc des courants de galaxies se déversant dans le bassin d'attraction du Laniakea, tandis que des courants en bleu foncé s'éloignent de ce bassin local et permettent de séparer notre continent de ses voisins. Le contour orange inclut les limites extérieures de ces courants. Ce domaine a une mesure de 500 millions d'années-lumière de diamètre et inclut $\sim 10^{17} M_{\odot}$ (100 millions de milliards de masses solaires). Pour la première fois, une équipe de recherche internationale, dont des chercheurs français, viennent de cartographier les nouvelles frontières de notre superamas de galaxies au sein duquel les galaxies s'écoulent littéralement, à la manière de l'eau dans un bassin alluvial. Ils lui ont donné le nom hawaïen de Laniakea : « horizons célestes immenses ».

Dans l'Univers, les galaxies se regroupent dans des groupes ou amas, et se déplacent en suivant des « courants », le long de filaments délimitant de grandes régions connues sous le nom de « vides ». Les régions étendues, avec une haute concentration de galaxies, comme celle dans laquelle nous vivons, sont appelées des « superamas ». Notre galaxie, la Voie Lactée, qui abrite notre Système Solaire, fait partie d'un groupe de galaxies appelée Amas Local, qui comprend notamment la galaxie d'Andromède (M 31, la seule galaxie visible à l'œil nu dans l'hémisphère nord), la galaxie spirale du Triangle (M33) et le Grand Nuage de Magellan, qui est une galaxie satellite de la notre. Les autres membres de l'Amas Local sont des petites galaxies elliptiques ou irrégulières, ainsi que des galaxies naines spiroïdales. La taille de notre Amas Local

est d'environ 3 millions d'années lumière, c'est-à-dire 30 fois le diamètre de la Voie Lactée. Or l'Amas Local est relativement proche d'autres amas de galaxies comme celui de la Vierge, permettant d'édifier un nouveau système. En effet, les amas de galaxies sont regroupés dans des ensembles plus vastes appelés superamas. Mais la définition d'un superamas vient d'évoluer considérablement grâce à une cartographie dynamique.

Pour la première fois, les chercheurs proposent une définition dynamique de notre superamas de galaxies, évoquant la notion de « bassin versant », comme en hydrologie. En effet, il leur a été possible de délimiter un volume cosmique dans lequel circulent des « courants de galaxies », comme des cours d'eau dans des ravines. D'un diamètre de 500 millions d'années-lumière, ce « continent extragalactique » contient une masse d'environ 100 millions de milliards de fois la masse du Soleil. Les chercheurs lui ont donné le nom hawaïen Laniakea, accepté par l'Union Astronomique Internationale. Ce nom signifie « horizons célestes immenses », en hommage à Hawaï, pays de navigateurs aux étoiles qui abrite quelques-uns des plus grands télescopes du monde, utilisés pour cette découverte et celles qui suivront. Cette recherche met un point final aux questionnements sur le « Grand Attracteur », qui duraient depuis 30 ans : les chercheurs montrent que cette région qui semblait attirer toutes les galaxies voisines, sans paraître pourtant plus dense, apparaît en réalité aujourd'hui comme un large vallon où se déverse la matière, un peu comme le point le plus bas d'une large baignoire plate. L'étude montre par ailleurs que Laniakea contient environ 100 000 grosses galaxies comme la nôtre et 1 million de plus petites.



Cosmographie de l'Univers Local

Une tranche du Superamas Laniakea dans le plan équatorial supergalactique. Les nuances de couleur représentent des valeurs de densité de matière avec en rouge la haute densité et en bleu les vides. Les galaxies individuelles sont montrées comme des points blancs. On observe en blanc des courants de galaxies se déversant dans le bassin d'attraction du Laniakea, tandis que des courants en bleu foncé s'éloignent de ce bassin local et permettent de séparer notre continent de ses voisins. Le contour orange inclut les limites extérieures de ces courants. Ce domaine a une mesure de 500 millions d'années-lumière de diamètre et inclut $\sim 10^{17} M_{\odot}$ (100 millions de milliards de masses solaires)

Une nouvelle méthode pour cartographier les galaxies

Les réseaux de structures sont connectés avec des frontières mal définies lorsque l'on ne fait qu'une cartographie statique. L'équipe a mis au point une nouvelle méthode pour définir les structures à grande échelle à l'aide des courants de galaxies. Ces calculs sont basés sur les observations conduites par Hélène

Courtois, directrice d'une équipe de recherche à l'Institut de physique nucléaire de Lyon (Université Claude Bernard Lyon 1 / CNRS), et les méthodes de visualisation de Daniel Pomarède, chercheur à l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu) du CEA de Saclay. Il s'agit d'une méthode ressemblant à la recherche de bassins versants alluviaux. Dans les cartes 3D de l'Univers, nous pouvons trouver des lieux où les courants de galaxies, qui sont dus aux concentrations de matière, se séparent ou se rassemblent tout comme l'eau de part et d'autre de la ligne de partage des eaux. Pour aboutir à une telle cartographie dynamique, les chercheurs se sont appuyés sur le plus grand catalogue de vitesses de galaxies jamais publié (8 000 galaxies), qu'ils ont préparé depuis des années pour construire une carte vaste et détaillée de la distribution de matière (noire et lumineuse) dans l'univers. Dans ce volume d'Univers, tous les mouvements des galaxies sont dirigés vers l'intérieur (par analogie, cette surface délimite notre bassin alluvial). Notre superamas (ou continent de galaxies) est alors défini comme étant le volume englobé, se séparant nettement des autres continents voisins : défini de cette manière, Laniakea est cent fois plus volumineux que ce que l'on pensait depuis 50 ans.

n) **Un « essai » de faire cohabiter la Relativité généralisée et la théorie des quanta.**

[Voir « l'intrication » en Annexe IV.](#)

o) **La confirmation de l'existence des ondes gravitationnelles**, prédites par Einstein en 1916.

[Voir en Annexe III.](#)

In fine, notre « podium » des 3 génies majeurs ayant contribué le plus à l'astronomie de leur temps est, dans l'ordre chronologique :

**Galileo Galilei (dit Galilée)
Isaac Newton
Albert Einstein**

Mais, là aussi, ce n'est qu'un jugement subjectif qui n'engage que nous !

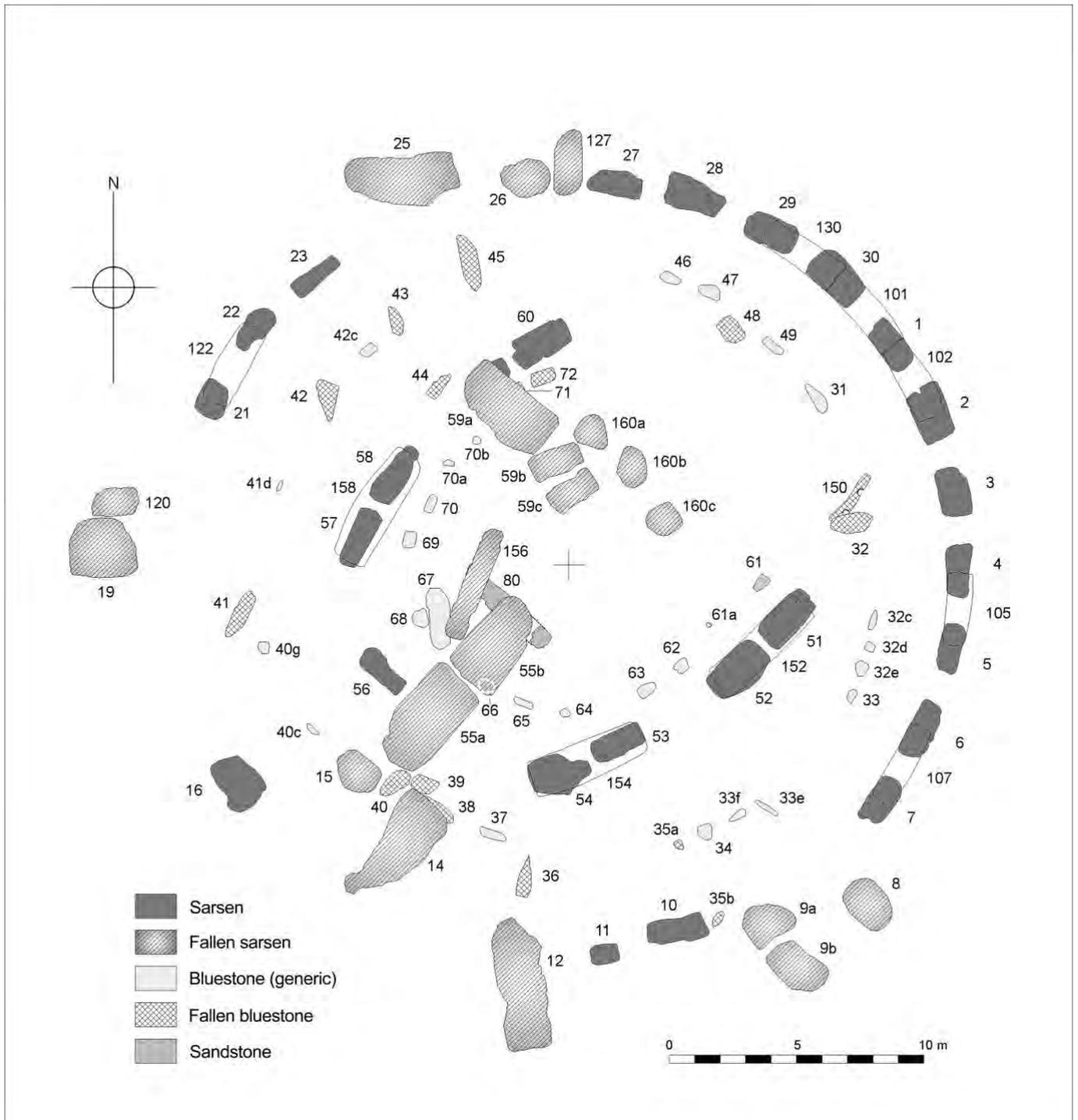
IX Iconographie

A) Préhistoire

1) Stonehenge



Stonehenge en Angleterre



Stonehenge : Plan du cromlech central, avec la numérotation officielle des pierres.

- Cercle extérieur de sarsen : pierres 1 à 30 et linteaux 101 à 130.
- Cercle extérieur des pierres bleues : 31 à 49.
- Trilithons de sarsen : pierres 51 à 60 et linteaux 152 à 160.
- Fer à cheval des pierres bleues : 61 à 72.
- « Pierre d'autel » : 80

2) Carnac



Alignements de menhirs sur le site de Carnac (Morbihan)



Le géant du Manio, plus grand menhir de Carnac

3) Kokino

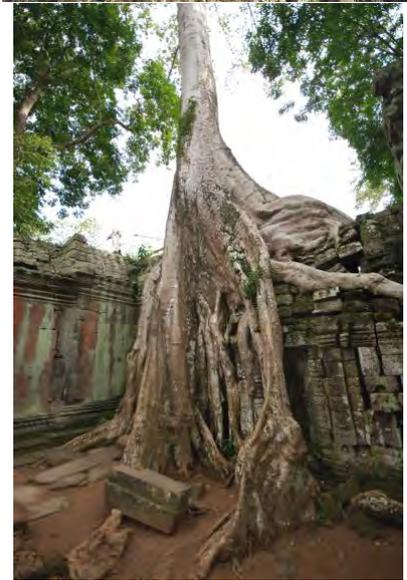


Kokino (Macédoine)



Temples d'Angkor :
Angkor Wat, Angkor Thom
Le Bayon, Banteay Srei

Photos Olivier Sabbagh
(Novembre 2011)



Merveilleux pays que le Cambodge, incroyable choc artistique et culturel que procure la vue de ces temples en pleine jungle. Son côté « site astronomique » est intéressant mais assez peu connu, voire même assez secondaire, compte tenu du reste. O.S.

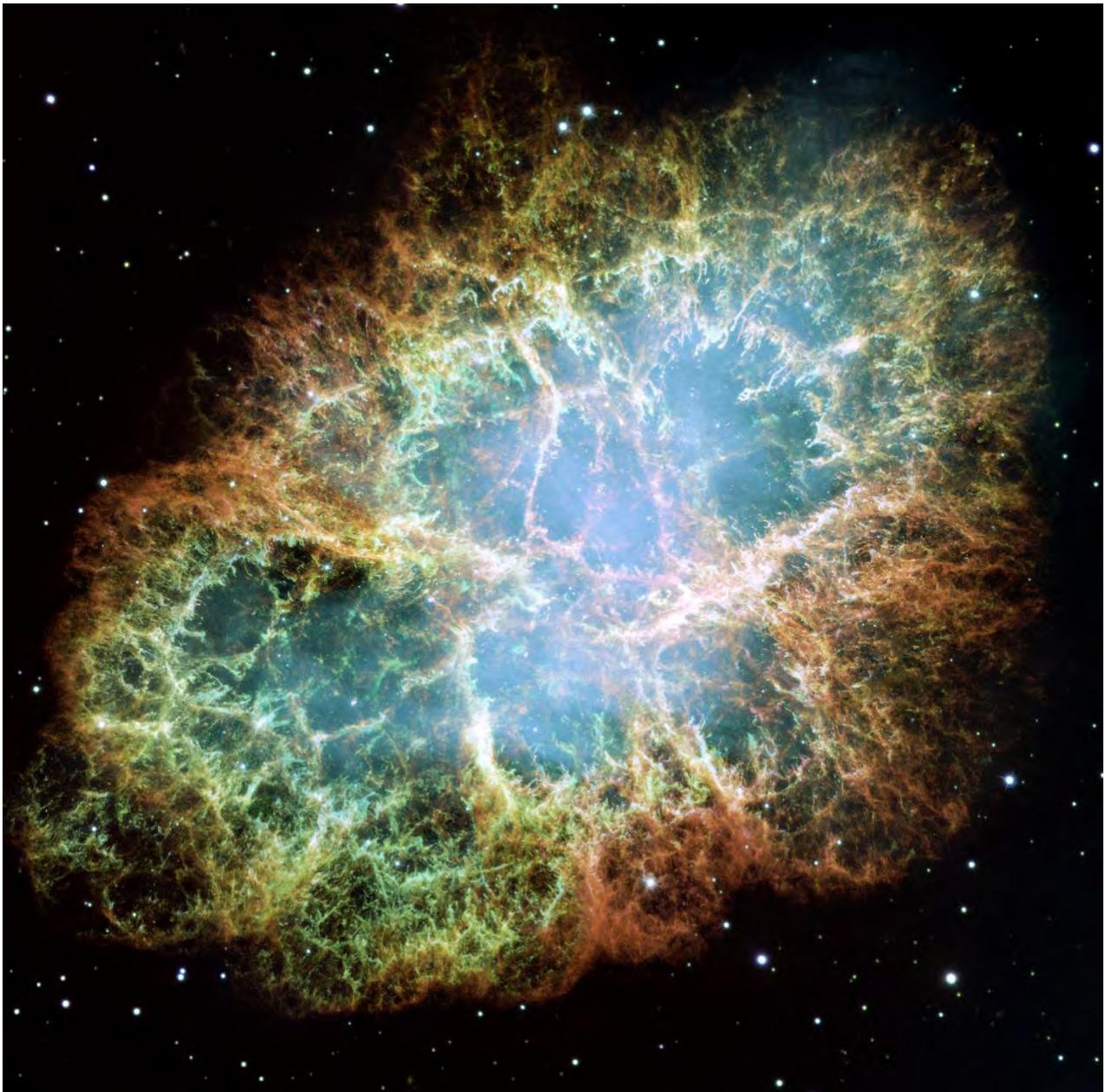
B) Antiquité et Moyen-Âge

1) Égypte



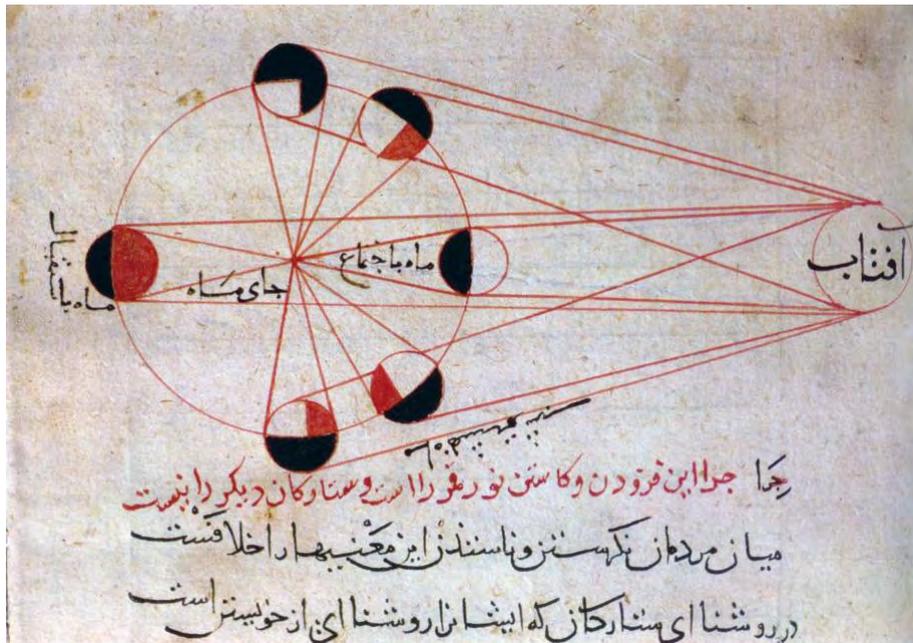
Le site d'Abou Simbel, à l'extrême Sud de l'Égypte sur la rive du lac Nasser (lac de retenue du barrage d'Assouan)

2) Chine



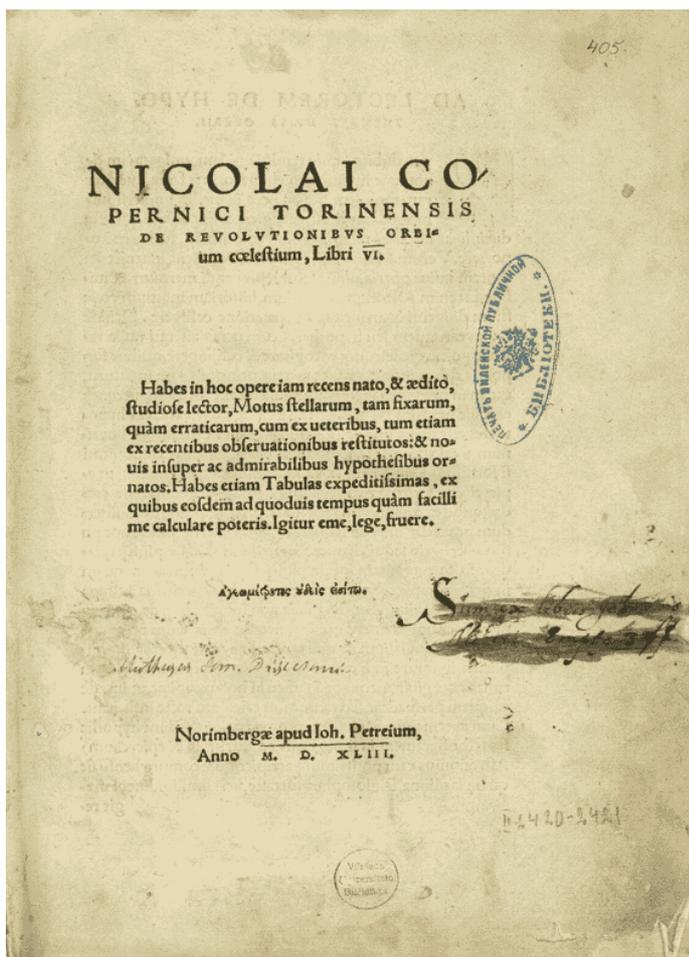
La « nébuleuse du Crabe (M1), reste d'une supernova ayant explosé en 1054 et observée par les chinois pendant 2 ans

3) Monde musulman



Théorie des éclipses et des phases de la Lune : un manuscrit d'Al-Biruni (973-1048)

C) Renaissance

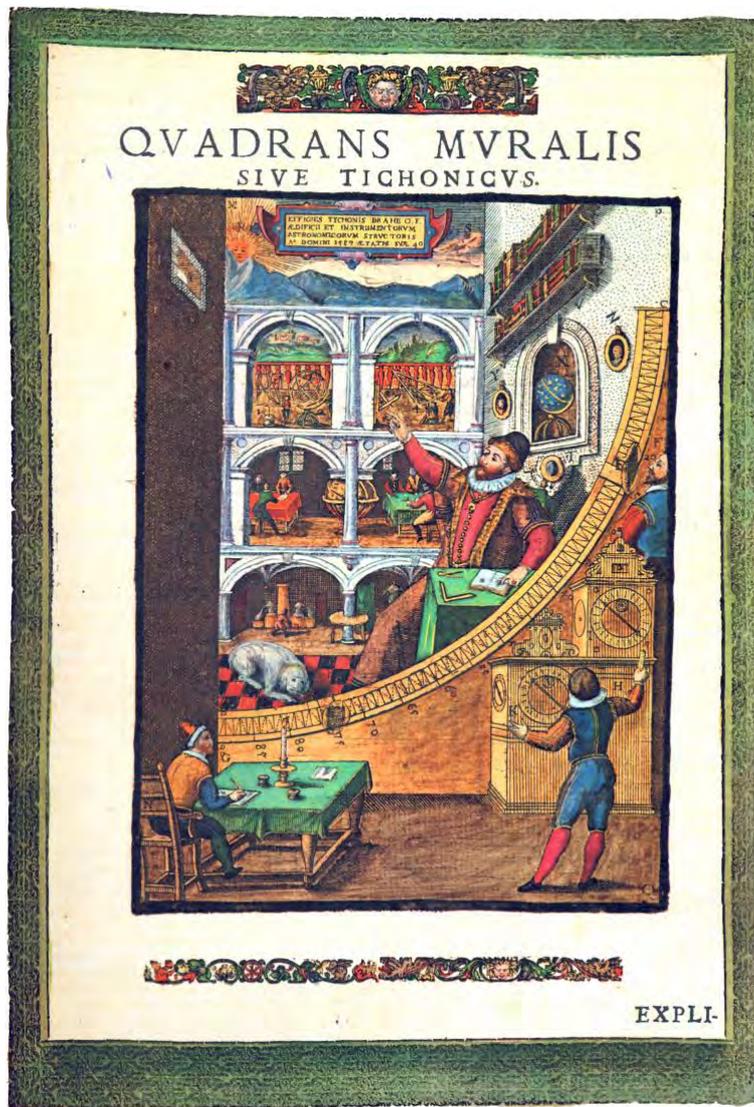


Nicolai Copernici Torinensis De Revolutionibus Orbium Coelestium, Libri VI - (Sur les révolutions des orbes célestes, en six livres, par Nicolas Copernic de Toruń) - Fac simile de l'édition originale de 1543 imprimée à Nuremberg par Johann Petreius



Première page de la 2^e édition du De Revolutionibus, par la maison Henricpetri à Bâle, 1566, à laquelle est jointe la Narratio Prima de Rheticis

1^{ère} et 2^e éditions du « De revolutionibus orbium coelestium » de Copernic en 1543 et 1566



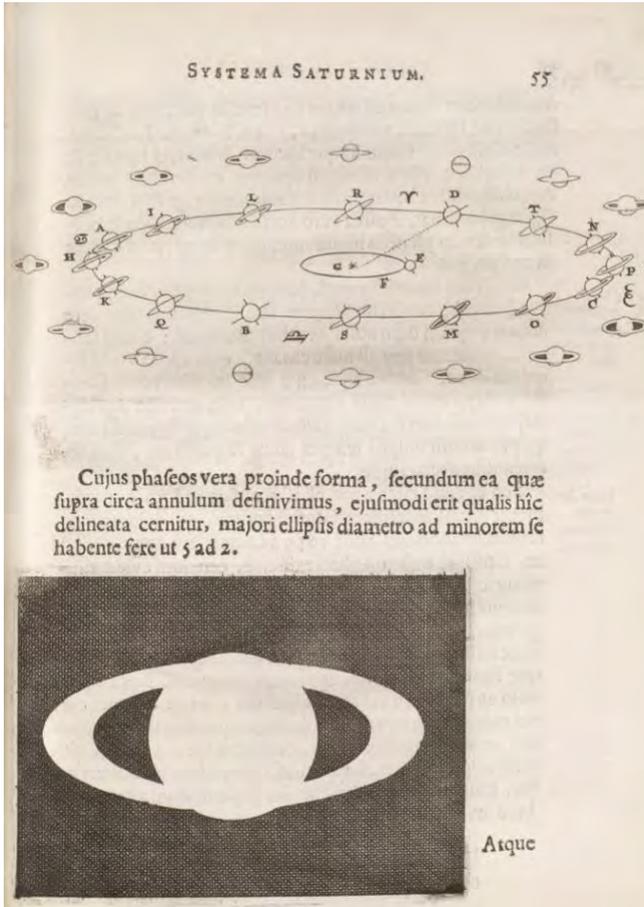
Estampe représentant le quadrant mural de Tycho Brahe (vers 1600)



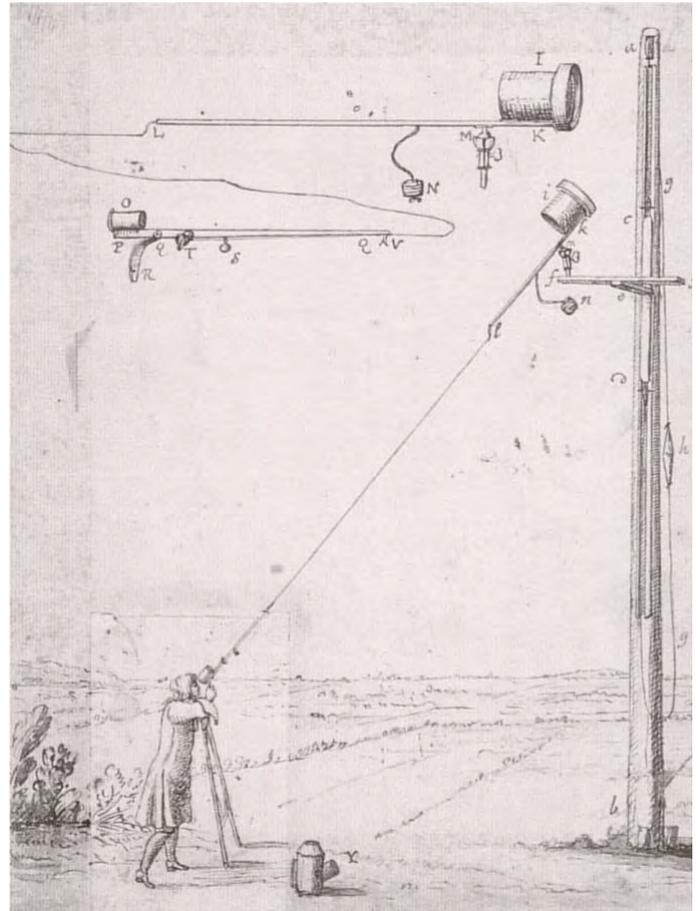
Statues de Tycho Brahe et Johannes Kepler à Prague, République tchèque

D) XVII^e siècle

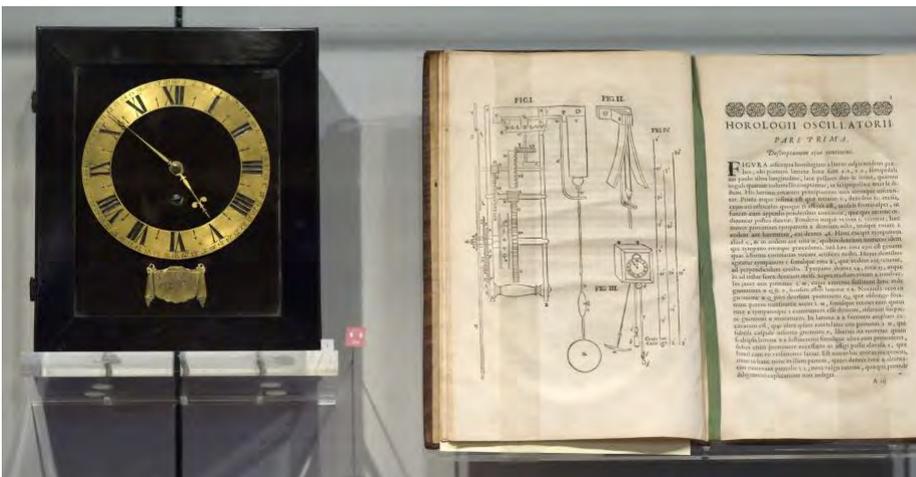
1) Christian Huygens



Explication, faite par Huygens, des différents aspects des anneaux de Saturne au fil du temps



Le « télescope sans tube » de Huygens. Dessin de 1684 dans sa « Astroscopia Compendiaria tubi optici molimine liberata »



Horloge à pendule conçue par Huygens, construite par l'horloger Salomon Coster en 1657, et une copie de son ouvrage « Horologium Oscillatorium »

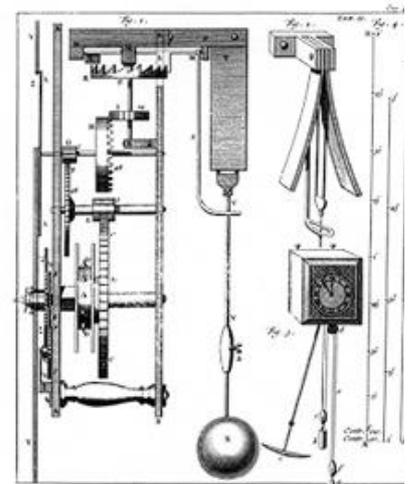


Illustration de l'Horologium Oscillatorium (1658), par Huygens

2) Isaac Newton

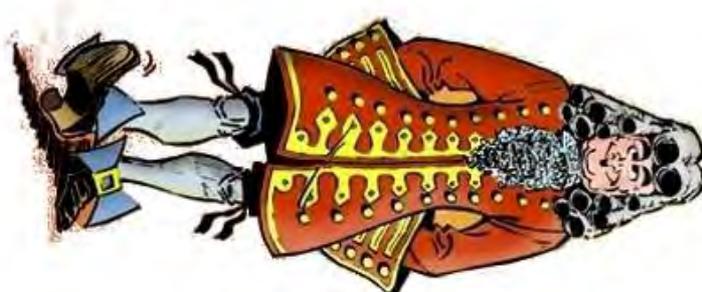
Une autre approche : Newton et le mythe de la pomme, version Gotlib...



Rubrique à Brac © Gotlib - Bargaud



EXPLICATION DE CE SYMBOLE : a) L'ENTONNOIR SIGNIFIE QUE L'AUTEUR DE CES 2 PAGES LES JUGE D'UNE BÊTISE PRISANT L'INSANITÉ. b) LE BILLET DE BANQUE SIGNIFIE QUE L'AUTEUR SE RÉJOUIT, MALGRÉ CA, DE L'ARGENT QU'ELLES VONT LUI RAPPORTER. (TOUTES CHOSSES QU'ON NE PEUT DÉCEMMENT PAS DIRE DANS UNE PUBLICATION DESTINÉE AUX JEUNES.)



E) XVIII^e siècle

William Herchel découvre Uranus, qu'il a d'abord pris pour une comète, puis 2 de ses satellites : Titania et Obéron



Uranus, photographié en 1986 par Voyager 2



Titania



Oberon

F) XIX^e siècle

De par la constatation de perturbations observées dans l'orbite d'Uranus, Urbain Jean Joseph Le Verrier calcule la position d'une nouvelle planète (Neptune) et la publie le 1^{er} juin 1846. Elle avait été vue par Galilée en 1612, mais il avait pensé que c'était une étoile, du fait de son mouvement très lent ! Le 31 août il précise même la masse et l'orbite de la planète. Le 23 septembre de la même année, sur les indications de Le Verrier, Johann Gottfried Galle de l'Observatoire de Berlin trouve visuellement la planète, à moins de 1° de la position calculée par Le Verrier.



Neptune, photographiée en 1989 par Voyager 2

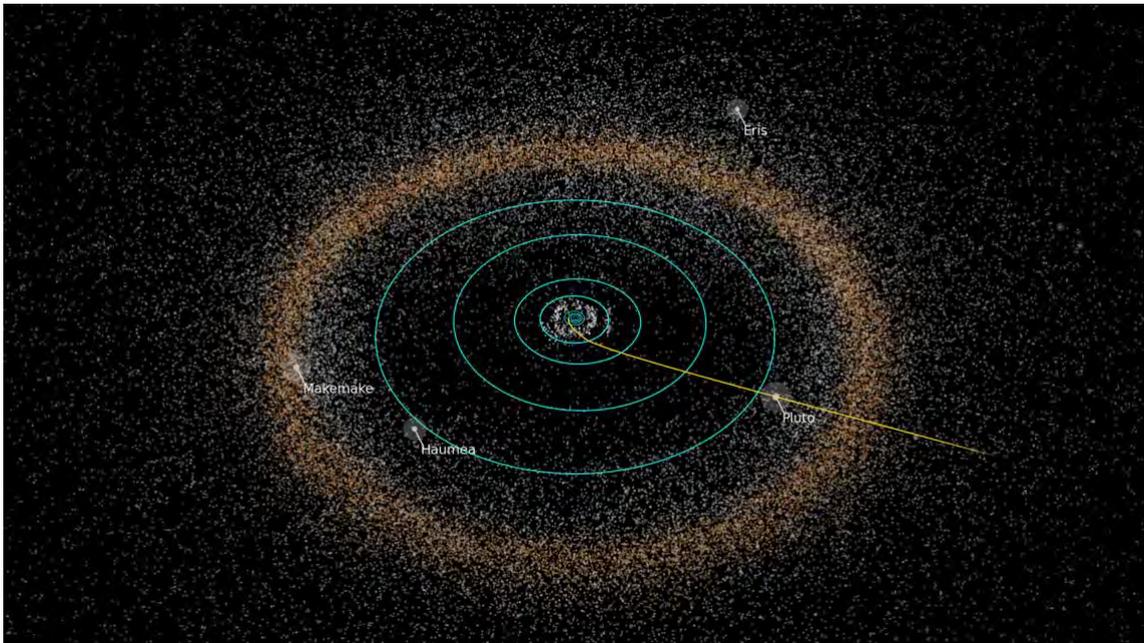
G) XX^e siècle



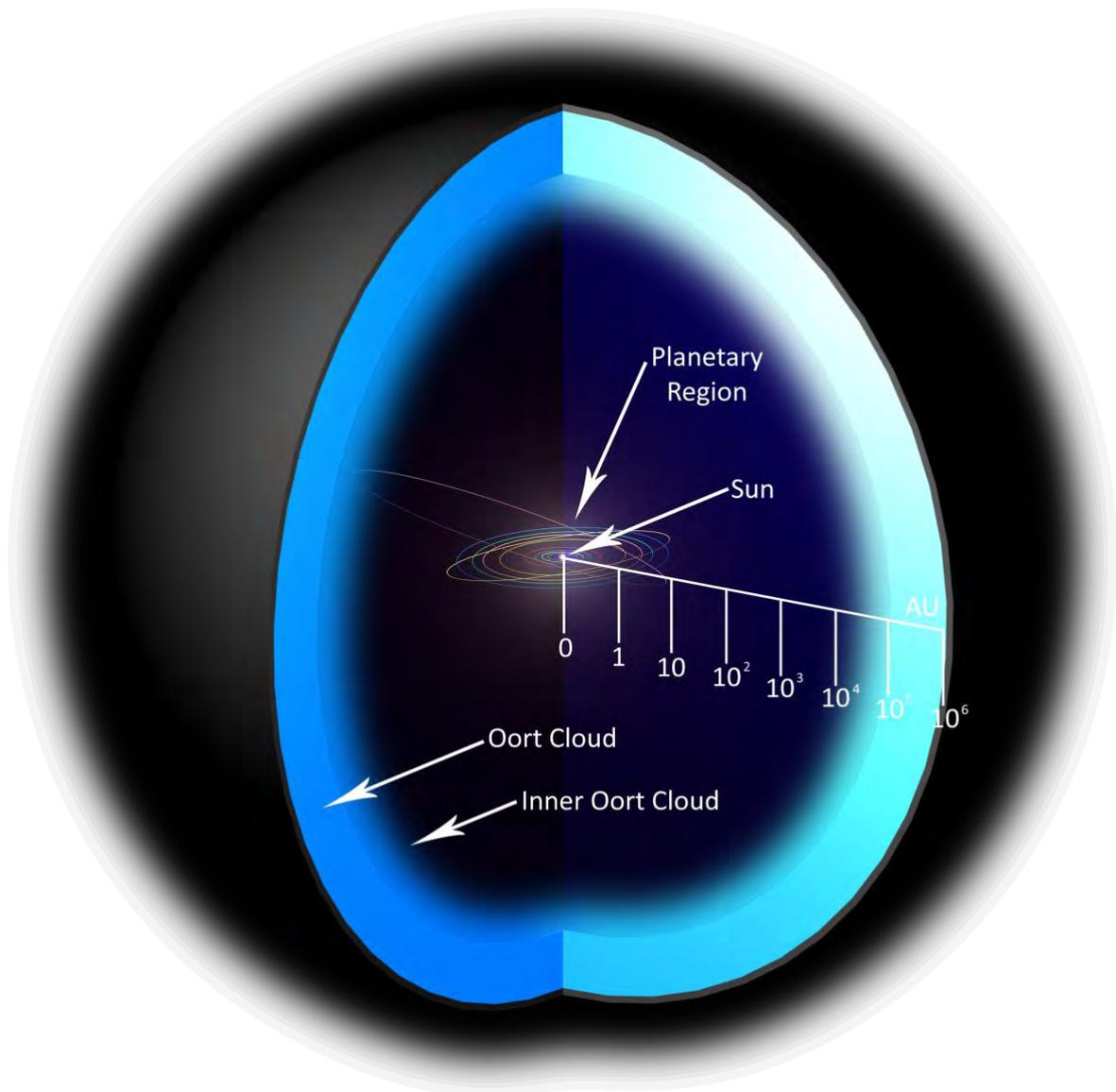
C'est avec cette antenne mise au point aux Laboratoires Bell qu'en 1965, Penzias et Wilson sont parvenus à capter un rayonnement radio uniforme, dit « fond diffus cosmologique ».



Pluton, découverte en 1930 par Clyde Tombaugh, photographiée par la sonde New Horizons le 14 juillet 2015



La ceinture de Kuiper, hypothèse émise par Kuiper en 1951, dont l'existence sera avérée vers la fin du XX^e siècle



Le nuage de Oort, pressenti par Jan Oort en 1950 par l'étude de comètes à très longues périodes

Annexe I : Noms des 90 étoiles les plus brillantes – noms d'origine arabo-persanne

Liste des étoiles les plus brillantes classées par magnitude apparente V						Liste des étoiles les plus brillantes classées par magnitude apparente V					
Rang	Nom commun	Désignation de Bayer	Type spectral	Magnitude apparente V	Distance (en al)	Rang	Nom commun	Désignation de Bayer	Type spectral	Magnitude apparente V	Distance (en al)
0	Soliel		G2-V	-26,73	1 UA	46	Alphard	α Hya	K3 II-III		180 al
1	Sirius	α CMa	A1V/DA	-1,47	8,6 al	47	Hamel	α Ari	K3 II-III	2	66 al
2	Canopus	α Car	F0Ib	-0,72	310 al	48	Polaris	α UMi	F7: Ib-II	+2,01 (var)	430 al
3	Arcturus	α Boo	K1.5 IIIpe	-0,04 (var)	34 al	49	Delta Velorum A	δ1 Vel	A1 V	2,03	80 al
4	Alpha Centauri A	α1 Cen	G2V	-0,01	4 al	50	Deneb Kaitos	β Cen	K0 III	2,04	96 al
5	Véga	α Lyr	A0Va	0,03	25 al	51	Saiph	α Ori	B0.5 Iavar	2,05	720 al
6	Rigel	β Ori	B8Ia	0,12	630 al	52	Nunki	α Sgr	B3	2,06	220 al
7	Procyon	α CMi	F5 IV-V	0,38	11 al	53	Menkent	θ Cen	K0 IIIIb	2,06	61 al
8	Achernar	α Eri	B3Vpe	0,46	130 al	54	Alpheratz	α And	B8IVpMnHg	2,06	97 al
9	Bételgeuse	α Ori	M1-2 Ia-lab	+0,5 (var)	430 al	55	Mirach	β And	M0IIIvar	2,06	200 al
10	Hadar	β Cen	B1 III	0,6	530 al	56	Kochab	β UMi	K4 III	2,08	130 al
11	Capella A	α1 Aur	G5IIIe	0,71	42 al	57	AcruX B	α2 Cru	B1 V	2,09	320 al
12	Altair	α Aql	A7IV-V	0,77	16 al	58	Ras Alhague	α Oph	A5III	2,1	47 al
13	Aldébaran	α Tau	K5III	+0,85 (var)	65 al	59	Algol	β Per	B8 V	+2,12 (var)	93 al
14	Capella B	α2 Aur	G0III	0,96	42 al	60	Beta Gruis	β Gru	M5III	2,13	170 al
15	L'Épi	α Vir	B1III-IV	1,04	260 al	61	Denebola	β Leo	A3 V	2,14	36 al
16	Antares	α Sco	M1Ib	1,09	600 al	62	Nos	ζ Pup	O5Iaf	2,21	1 400 al
17	Pollux	β Gem	K0 IIIb	1,15	34 al	63	Lambda Velorum	λ Vel	K4.5 Ib-II	2,23	570 al
18	Fomalhaut	α PsA	A3V	1,16	25 al	64	Eltanin	γ Dra	K5 III	2,23	150 al
19	Deneb	α Cyg	A2 Iae	1,25	1 550 al	65	Alphecca A	α1 CrB	A0 V	2,24	75 al
20	Mimosa	β Cru	B0.5IV	1,3	350 al	66	Sadir	γ Cyg	F8 Ib	2,24	1 500 al
21	Alpha Centauri B	α2 Cen	K1-V	1,33	4 al	67	Schedar	α Cas	K0 IIIa	2,25	230 al
22	Regulus	α Leo v	B7 V	1,35	77 al	68	Aspidiske	t Car	A8 Ib	2,25	690 al
23	Aenus I	α1 Cru	B0.5IV	1,4	320 al	69	Almach A	γ1 And	K3I Ib	2,26	350 al
24	Adhara	ε CMa	B2II	1,51	430 al	70	Mizar A	ζ1 UMa	A1 V	2,27	78 al
25	Shaula	λ Sco	B1.5IV	1,62	700 al	71	Caph	β Cas	F2 III-IV	2,27	54 al
26	Gacrux	γ Cru	M4 III	1,63	88 al	72	Epsilon Centauri	ε Cen	B1III	2,27	380 al
27	Bellatrix	γ Ori	B2III	1,64	240 al	73	Algieba A	γ1 Leo	K1-IIIbCN-0.5	2,28	130 al
28	Elnath	β Tau	B7III	1,68	130 al	74	Alpha Lupi	α Lup	B1.5 III	2,28	550 al
29	Miaptaecidus	β Car	A2 IV	1,7	110 al	75	Dschubba	δ Sco	B0.2 IV	2,29	400 al
30	Anilam	ε Ori	B0 Iab	1,7	1 300 al	76	Wei	ε Sco	K2 IIIb	2,29	65 al
31	Alnitak A	ζ1 Ori	O9 Iab	1,74	820 al	77	Eta Centauri	η Cen	B1.5Vne	2,32	310 al
32	Al Na'ir	α Gru	B7IV	1,74	100 al	78	Merak	β UMa	A1 V	2,35	79 al
33	Alloth	ε UMa	A0pCr	1,76	81 al	79	Ankaa	α Phe	K0 III	2,37	77 al
34	Dubhe A	α1 UMa	K0 III	1,79	120 al	80	Girtab	α Sco	B1.5 III	2,38	460 al
35	Kaus Australis	ε Sgr	B9.5 III	1,8	140 al	81	Gamma Cassiopeiae	γ Cas	B0.5IVe	2,39	610 al
36	Subail al Muhlif A	γ12 Vel	O9	1,81	840 al	82	Enif	ε Peg	K2Ib	2,4	670 al
37	Mirfak	α Per	F5 Ib	1,82	590 al	83	Aludra	η CMa	B5 Ia	2,4	3 200 al
38	Wezen	δ CMa	F8 Ia	1,84	1 800 al	84	Avior A	ε1 Car	K0 III	2,4	630 al
39	Alkaid	η UMa	B3V SB	1,85	100 al	85	Scheat	β Peg	M2.5 II-III	2,42	200 al
40	Sargas	θ Sco	F1 II	1,86	270 al	86	Phecda	γ UMa	A0Ve SB	2,43	84 al
41	Alhena	γ Gem	A0 IV	1,9	100 al	87	Alderamin	α Cep	A7IV	2,44	49 al
42	Alpha Pavonis	α Pav	B2IV	1,91	180 al	88	Kappa Velorum	α Vel	B2 IV-V	2,46	540 al
43	Atria	α TrA	K2 IIb-IIIa	1,92	420 al	89	Markab	α Peg	B9 III	2,49	140 al
44	Castor A	α1 Gem	A1 V	1,96	52 al	90	Gienah	ε Cyg	K0 III/M3	2,5	72 al
45	Murzim	β CMa	B1 II-III	1,98	500 al						

En rouge, les noms d'étoiles d'origine arabe, soit 56 étoiles sur les 90 les plus brillantes (62%) visibles depuis la Terre. Certaines de ces étoiles dont les noms ne sont pas d'origine arabe font partie du ciel de l'hémisphère Sud et n'ont pas pu être vues par les arabes des IX^e au XVI^e siècles. Les 9 étoiles dont les noms sont en bleu sont dans l'hémisphère Sud, invisibles depuis les pays arabes. Donc le pourcentage de noms arabes est de 56/81 = 69%.

Annexe II

Les lois de Kepler

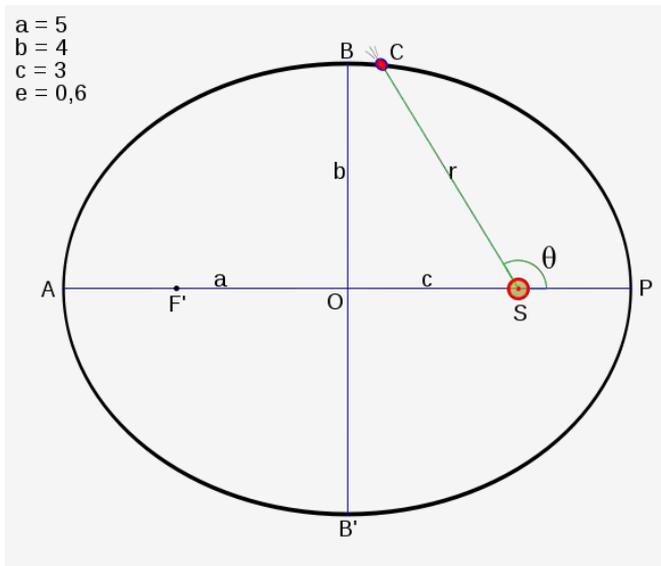
En astronomie, les **lois de Kepler** décrivent les propriétés principales du mouvement des planètes autour du Soleil. Elles ont été découvertes par Johannes Kepler à partir des observations et mesures de la position des planètes faites par Tycho Brahe, mesures qui étaient très précises pour l'époque. Copernic avait soutenu en 1543 que les planètes tournaient autour du Soleil, mais il s'appuyait sur le mouvement circulaire uniforme, hérité de l'antiquité grecque, et les moyens mathématiques n'étaient pas si différents de ceux utilisés par Ptolémée pour son système géocentrique.

Les deux premières lois de Kepler sont publiées en 1609 et la troisième en 1618. Les orbites elliptiques, telles qu'énoncées dans ses deux premières lois, permettent d'expliquer la complexité du mouvement apparent des planètes dans le ciel sans recourir aux épicycles, excentriques et autre équants (ou substituts de celui-ci) des modèles copernicien et ptoléméen. En 1687, s'appuyant sur les travaux de Galilée, Kepler et Huygens, Isaac Newton découvre la loi de la gravitation qui lui permet d'expliquer les trois lois de Kepler.

Énoncé des trois lois de Kepler

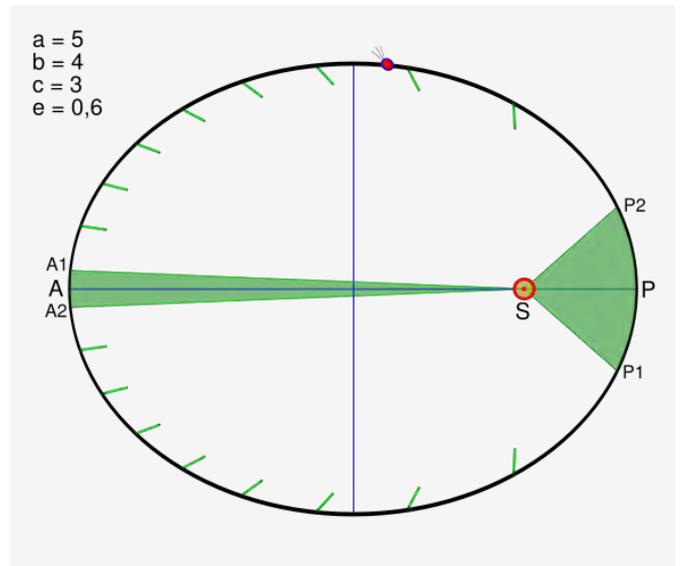
Première loi – Loi des orbites

Les planètes du système solaire décrivent des trajectoires elliptiques dont le Soleil occupe l'un des foyers. Dans le référentiel héliocentrique, le Soleil occupe toujours l'un des deux foyers de la trajectoire elliptique des planètes qui gravitent autour de lui. À strictement parler, c'est le centre de masse qui occupe ce foyer; la plus grande différence est atteinte avec Jupiter qui, du fait de sa masse importante, décale ce centre de masse de 743 075 km; soit 1,07 rayons solaires — des déplacements plus importants peuvent être obtenus en cumulant les effets des planètes sur leur orbite. Les ellipses que décrivent les centres de gravité des planètes sont quasi-circulaires, ayant une faible ou très faible excentricité orbitale, les plus élevées étant celles de Mercure (~0,2), suivie de celle de Mars (~0,09). C'est cette dernière que Kepler a utilisée pour sa découverte de la première loi, et il est aidé en cela par la faiblesse de l'excentricité de l'orbite de la Terre (~0,017) relativement à celle de Mars. Les foyers sont eux bien distincts du centre de l'ellipse.



1^{ère} loi, loi des orbites

Schéma d'une orbite elliptique, l'excentricité étant très exagérée vis-à-vis de celles des planètes du système solaire



2^{ème} loi, loi des aires

Loi des aires : chaque intervalle correspond à 5 % de la période

Deuxième loi – Loi des aires

Si S est le Soleil et M une position quelconque d'une planète, l'aire balayée par le segment $[SM]$ entre deux positions C et D est égale à l'aire balayée par ce segment entre deux positions E et F si la durée qui sépare les positions C et D est égale à la durée qui sépare les positions E et F . La vitesse d'une planète devient donc plus grande lorsque la planète se rapproche du Soleil. Elle est maximale au voisinage du rayon le plus court (périhélie), et minimale au voisinage du rayon le plus grand (aphélie).

De cette deuxième loi, on déduit que la force exercée sur la planète est constamment dirigée vers le Soleil. Kepler écrira à un collègue : *Une chose est certaine : du Soleil émane une force qui saisit la planète.*

De la loi des aires découle directement l'équation de Kepler qui permet de trouver l'aire parcourue en fonction de la position exacte d'une planète. En effet la deuxième loi de Kepler implique que la planète accélère en approchant du Soleil et décélère en s'éloignant du Soleil. La vitesse n'est donc pas constante mais seulement l'aire parcourue. C'est pourquoi à $T/4$ la planète n'a pas parcouru un angle de 90° mais a parcouru une aire de $(\text{Aire Totale}/4)$.

L'équation est de la forme $M = E - e \sin(E)$. Avec M l'aire parcourue (connue sous le nom d'anomalie moyenne), e est l'excentricité et E l'angle au centre de l'ellipse. La réciproque de l'équation de Kepler qui revient à trouver l'angle de la planète en fonction de l'aire (et donc du temps), ne possède pas de résolution exacte. Mais il existe des formes approchées sous forme de sommes infinies ainsi que des approximations grâce à la méthode de Newton.

Troisième loi – Loi des périodes

Le carré de la période sidérale P d'une planète (temps entre deux passages successifs devant une étoile lointaine) est directement proportionnel au cube du demi-grand axe a de la trajectoire elliptique de la planète :

$$\left(\frac{2\pi}{P}\right)^2 \cdot a^3 = k$$

avec k constant. Les lois de la gravitation universelle énoncées par Isaac Newton permettent de déterminer cette constante en fonction de la constante gravitationnelle G , de la masse du Soleil M_\odot et de la masse de la planète m gravitant autour du Soleil selon

$$k = G(M_\odot + m)$$

soit, avec M très supérieur à m

$$k = GM_\odot$$

En exprimant les distances en unités astronomiques et les périodes en années, la loi s'exprime très simplement :

$$P = \sqrt{a^3}$$

De cette troisième loi, appelée aussi « loi harmonique de Kepler » car elle exprime un invariant à travers tout le système solaire, donc une certaine harmonie de celui-ci (le mouvement de toutes les planètes est unifié en une loi universelle) on déduit qu'il existe un facteur constant entre la force exercée et la masse de la planète considérée, qui est la constante de gravitation universelle, ou constante gravitationnelle. Cette formule avec celles de l'ellipse permet de calculer les différents paramètres d'une trajectoire elliptique à partir de très peu d'informations. En effet, Johann Lambert (1728 - 1777) montra que la connaissance de trois positions datées permettaient de retrouver les paramètres du mouvement.

Quand ces lois s'appliquent-elles ?

Un exercice mathématique classique consiste à démontrer qu'on trouve les trois lois de Kepler pour un corps en mouvement à partir du moment où on admet que ce corps est soumis à une **accélération** inversement proportionnelle au carré de sa distance à un point fixe, et dirigée vers ce point. On parle d'accélération en $1/r^2$. Pour un même corps placé dans différentes conditions initiales, la troisième loi s'applique, avec un coefficient dépendant du problème.

Cas de la gravitation

En admettant que le Soleil est infiniment lourd par rapport aux planètes, et en négligeant leurs interactions entre elles, on constate que les planètes sont soumises aux trois lois. De plus, en combinant le principe fondamental de la dynamique (deuxième loi de Newton) et la loi universelle de la gravitation, on trouve que l'accélération est *indépendante de la masse du corps mobile* dans le cas d'un mouvement pour lequel la force qui s'applique est la gravité. En conséquence, la constante de la troisième loi est la même pour toutes les planètes. On peut appliquer les lois de Kepler pour tout autre objet central; seule la constante de la troisième loi change. C'est le cas, par exemple, de la Lune et de la Terre ou d'un satellite artificiel en orbite autour de celle-ci ou pour les multiples lunes de Saturne.

Problème à deux corps

Les lois de Kepler peuvent aussi s'appliquer dans le cas d'un problème à deux corps. Dans ce cas, le point central auxquelles se réfèrent les deux premières lois n'est pas le centre du corps le plus massif, mais le centre de masse des deux objets.

Cas de forces autres que la gravitation

Comme on l'a dit plus haut, les lois de Kepler ne sont pas limitées à la gravitation. Elles s'appliquent pour toute accélération en $1/r^2$. Or c'est aussi le cas de la loi de Coulomb en électrostatique.

Les lois de Kepler s'appliquent donc aussi aux électrons orbitant autour d'un noyau atomique. Le modèle de Bohr-Sommerfeld prévoit d'ailleurs des orbites elliptiques pour les électrons. Par contre, on n'a plus indépendance par rapport à la masse du corps mobile. La constante dans la troisième loi dépend des constantes de la force, et de la masse (indépendante d'un électron à l'autre). Toutefois aujourd'hui, la physique quantique considère que les électrons en orbite elliptique autour du noyau n'est qu'une approximation autrefois utile.

Découverte de nouveaux corps célestes

Johannes Kepler découvre ses lois grâce à un travail d'analyse considérable des observations astronomiques établies par Tycho Brahe, qui sont bien plus précises que celles déjà connues, il s'appuie en particulier sur les positions de Mars, dont il étudie le mouvement dès 1600. Il est persuadé que le soleil est, d'une façon ou d'un autre, le « véritable » centre du système solaire

(pour les planètes extérieures comme Mars, Copernic utilise un point fictif voisin du soleil comme centre d'un cercle sur lequel tourne à vitesse uniforme le centre d'un petit épicycle portant la planète). Guidé par cette conviction et après de longs errements, il finit par découvrir que le mouvement des planètes est elliptique, avec le soleil placé en un foyer de l'ellipse. Ses résultats et la façon dont il y est parvenu sont consignés dans son ouvrage majeur, l'*Astronomia nova*, paru en 1609, mais de fait terminé fin 1605.

Ces lois ont permis, elles-mêmes, d'affiner les recherches astronomiques et de mettre en évidence des irrégularités de mouvements de corps connus, par une étonnante progression de l'analyse. L'exemple le plus spectaculaire fut celui des irrégularités d'Uranus qui permit la découverte de Neptune par Le Verrier (1811-1877), par le calcul en 1846, découverte confirmée par l'observation de Galle (1812-1910) un mois plus tard.

Annexe III

Les ondes gravitationnelles

Les ondes gravitationnelles détectées un siècle après avoir été prédites

LE MONDE SCIENCE ET TECHNO | 11.02.2016 à 16h32 • Mis à jour le 16.02.2016 par David Larousserie



*Un interféromètre servant à l'observation des ondes gravitationnelles (LIGO) le 8 février 2016.
LIGO LABORATORY/REUTERS*

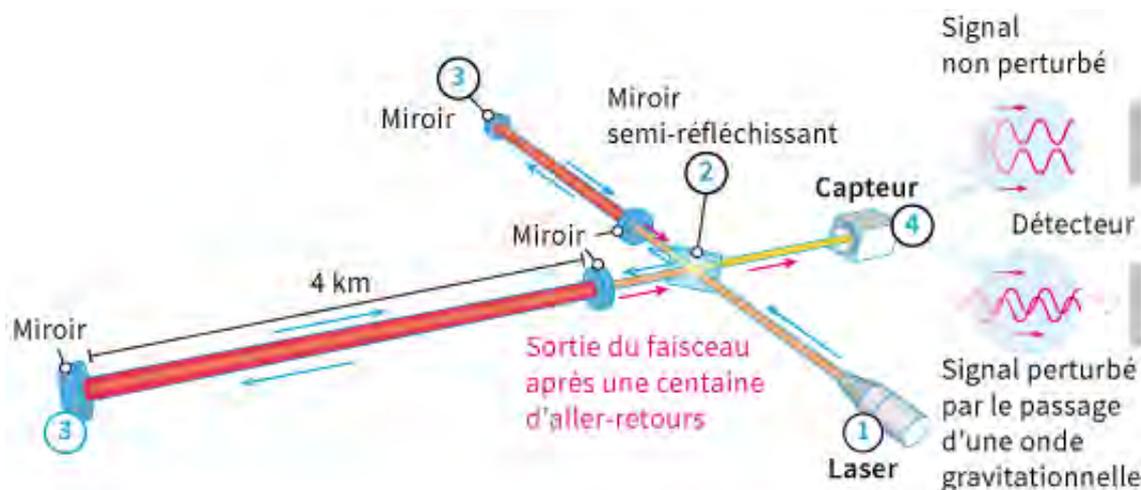
Enorme secousse dans le monde scientifique, pour une découverte majeure, à ranger au sommet des plus grandes percées de la connaissance. Pour la première fois, des vibrations venues de l'espace et d'une étrange nature ont été détectées sur Terre, confirmant une prédiction d'Albert Einstein vieille d'un siècle.

Ces tressautements, baptisés « ondes gravitationnelles », compriment et dilatent à la vitesse de la lumière l'espace-temps qui nous entoure, comme le son le fait avec l'air. « *Ou comme du veau en gelée tremblote lorsqu'on le secoue* », aime à dire Thibault Damour, spécialiste de la relativité générale à l'Institut des hautes études scientifiques de Bures-sur-Yvette (Essonne). L'espace-temps, c'est-à-dire la trame même du monde dans lequel nous vivons, est donc un contenant élastique, susceptible d'onduler à la manière des rides à la surface d'une eau perturbée par le lancer d'un caillou. La détection de ce premier clapotis cosmique est détaillée dans la revue *Physical Review Letters* du 11 février par l'équipe de l'instrument LIGO, aux Etats-Unis, en collaboration avec celles de Virgo, détecteur essentiellement franco-italien et construit près de Pise, et de GEO600, en Allemagne. « *Cette détection est le début d'une nouvelle ère, celle de l'astronomie des ondes gravitationnelles devenue désormais une réalité* », a lancé Gabriela Gonzalez, porte-parole de l'équipe LIGO, professeur d'astrophysique à la Louisiana State University.

Aboutissement

Les chercheurs ont repéré l'infime effet du passage d'une telle onde, qui a la capacité étonnante de distordre les distances, de les allonger ou de les réduire très légèrement. Aucune autre onde ne peut le faire. L'effet est faible, de l'ordre d'une variation du dix millième de la taille d'une particule élémentaire (environ 10^{-19} m). Autrement dit, comme si l'étoile la plus proche,

Proxima du Centaure, située à plus de quatre années-lumière de la Terre, se rapprochait de nous d'un demi-diamètre de cheveu... « Nous verrons enfin des choses jamais vues parce qu'elles n'émettent pas de lumière », souligne Pierre Binétruy, professeur à l'université Paris-VII. Pour mesurer une si minuscule distance, les chercheurs ont construit depuis vingt ans des « amplificateurs » géants. LIGO est ainsi fait de deux tunnels perpendiculaires de quatre kilomètres de long chacun. A l'intérieur, deux faisceaux laser, parfaitement synchronisés entre eux, effectuent des dizaines d'allers-retours entre des miroirs. Puis, ces deux rayons sont recombinaisonnés à la sortie afin de vérifier leur synchronisation. Si une onde gravitationnelle secoue l'espace-temps et se propage jusque-là, elle étire un trajet lumineux avant l'autre, désynchronisant les lasers.



Un jeu de miroirs

L'interférométrie laser consiste à détecter d'infimes variations de distance engendrées par la déformation de la Terre au passage d'une onde gravitationnelle. Le laser (1), séparé en deux branches (2), est piégé entre des miroirs (3), puis reconcentré vers un capteur (4). Si les longs bras de l'instrument sont déformés (de seulement 10^{-19} m), des interférences apparaissent.

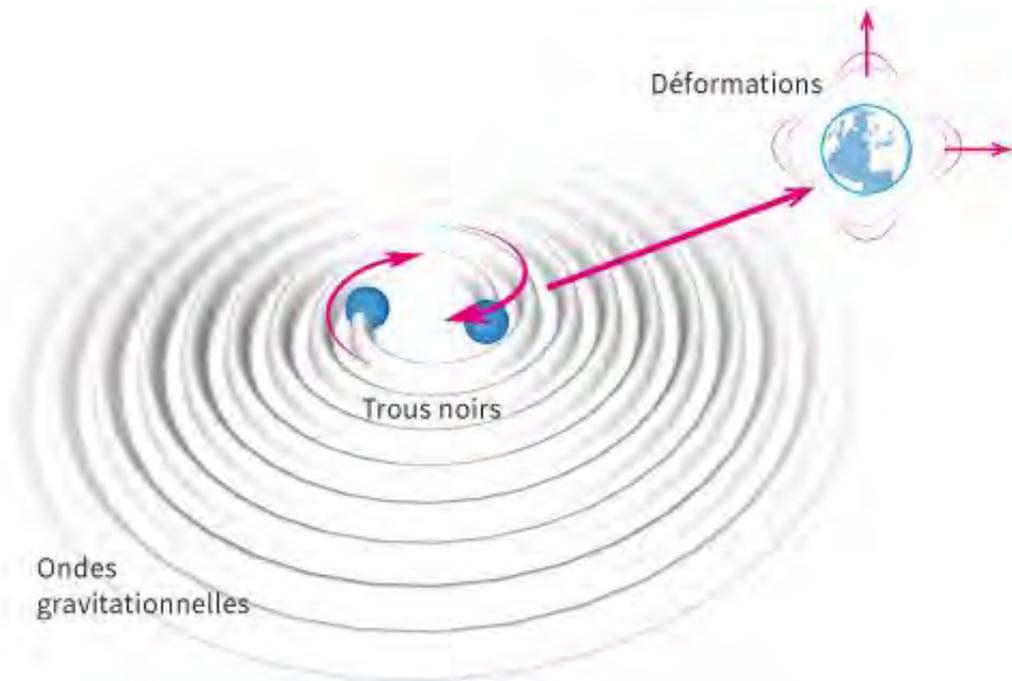
INFOGRAPHIE : HENRI-OLIVIER

SOURCE : LIGO VIRGO

C'est ce qui s'est passé le 14 septembre 2015 à 11 h 51 (heure française) sur les deux sites américains jumeaux construits en Louisiane et dans l'Etat de Washington à 3 000 kilomètres de distance. Les « sismographes » se sont agités avec 7 millisecondes de décalage. « *C'était trop beau pour être vrai !* », se souvient Jean-Yves Vinet, ancien responsable de Virgo (2007-2011), aujourd'hui directeur de recherche CNRS à l'Observatoire de la Côte d'Azur. Mais après des semaines de vérifications, écartant toute erreur, la confirmation est arrivée. « *C'est l'aboutissement d'un très gros travail. C'est enthousiasmant* », constate Eric Chassande-Mottin, chercheur CNRS du laboratoire Astroparticule et cosmologie.

Le signal enregistré par les chercheurs précise, en outre, l'origine de cette secousse, apportant une seconde découverte majeure. Il s'agit de la fusion de deux trous noirs en un nouveau, deux fois plus gros. Le duo est, respectivement, vingt-neuf et trente-six fois plus massif que le Soleil, et situé à plus d'un milliard d'années-lumière de la Terre. « *C'est extraordinaire. Quand j'ai commencé ces travaux, dans les années 1970, les trous noirs n'étaient à peine qu'une hypothèse* », se souvient Jean-Yves Vinet. Mieux, les chercheurs ont vu respirer ces géants d'où aucune lumière ni matière ne peuvent s'échapper. Lorsque les deux trous noirs se rapprochent, des ondes gravitationnelles sont créées, affolant périodiquement les détecteurs de LIGO. Puis, quand ils fusionnent, l'objet potatoïde qui en résulte n'adopte pas immédiatement une forme stable. Il vibre, telle une cloche, et fait trembler la gelée cosmique jusqu'aux détecteurs terrestres, d'une manière différente de la sarabande précédente. Un nouveau trou noir est en train de naître. « *La masse finale du trou noir est 62 fois celle du Soleil. C'est moins que la somme des deux trous noirs ; l'excédent a été converti en ondes gravitationnelles* », indique Nicolas Arnaud (CNRS) du Laboratoire de l'accélérateur linéaire à Orsay.

C'est à ce spectacle et à bien d'autres que rêvent d'assister plus souvent les astronomes désormais. « *Cela ouvre une grande période nouvelle et excitante. L'Univers est mû par la gravité, mais on ne l'observe qu'avec la lumière. Nous verrons enfin des choses jamais vues parce qu'elles n'émettent pas de lumière*, estime Pierre Binétruy, professeur à l'université Paris-VII. *Nous changeons d'époque.* » « *A chaque fois que nous braquons un nouvel instrument vers le ciel, on voit et on comprend des choses nouvelles. Ce fut le cas avec Galilée pointant sa lunette vers Jupiter et découvrant ses satellites* », rappelle Jean-Yves Vinet.



Une déformation de l'espace-temps

Prédite par Einstein en 1916, l'existence des ondes gravitationnelles est confirmée par un instrument américain, LIGO, qui a détecté une déformation de l'espace-temps engendrée par la réunion de deux trous noirs. Une preuve indirecte liée à l'observation de pulsars avait déjà conduit à l'attribution du prix Nobel à Hulse et Taylor en 1993.

Une nouvelle fenêtre astronomique

Seuls des événements impliquant de gros objets en mouvement peuvent faire osciller la gelée de veau cosmique. Comme des étoiles explosant en supernova ; ou des étoiles mourant et se contractant en trou noir ou en étoiles à neutrons, appelées également « pulsars », qui condensent l'équivalent de la masse du Soleil sur seulement dix kilomètres de rayon; ou encore l'origine violente de l'Univers au moment du Big Bang, il y a plus de treize milliards d'années.

Cette première découverte ouvre donc une nouvelle fenêtre astronomique sur ces phénomènes, en élargissant le spectre des moyens d'observation après la lumière visible, les rayons X, infrarouges, ultraviolets, les ondes radio ou même les neutrinos (des particules quasiment sans masse qui interagissent peu avec la matière).

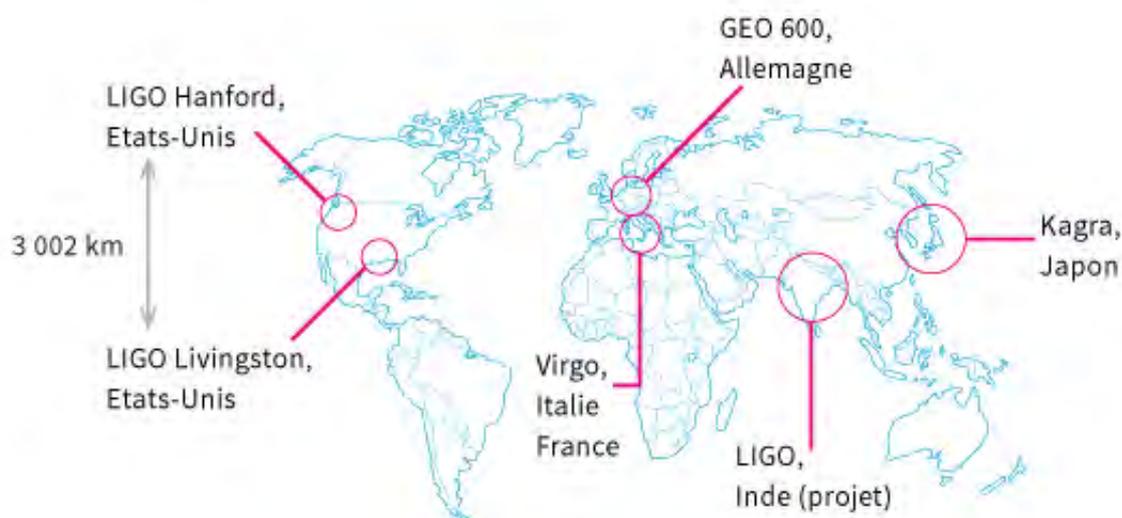
Pour la suite, Virgo fait actuellement peau neuve pour être aussi précis que son collègue américain et reprendre du service avant la fin 2016. Son couplage avec LIGO permettra une localisation précise des sources dans le ciel. Les Japonais achèvent Kagra; les Indiens comptent sur LIGO India. Et les chercheurs voient encore plus loin. Les instruments terrestres sont en effet limités à l'observation d'objets peu massifs et proches, toutes proportions gardées.

En effet, plus les « cailloux » agitant l'espace-temps sont gros, plus les crêtes des vagues créées sont éloignées et plus il faut des bras grands pour en saisir le passage. Des trous noirs, plusieurs millions de fois plus lourds que le Soleil, comme celui au cœur de notre galaxie, resteront en fait invisibles à LIGO et à Virgo.

Des rumeurs bruissent déjà sur le fait que le détecteur LIGO aurait d'autres secousses dans son sac. La suite consistera à installer en orbite eLISA, une sorte de triangle de faisceaux laser dont les « bras » d'un million de kilomètres de long bougeraient sous l'effet d'ondes gravitationnelles. Lancement prévu dans les années 2030. L'Agence spatiale européenne a mis sur orbite, le 3 décembre 2015, LISA Pathfinder, un satellite destiné à tester des technologies nécessaires à eLISA.

Cette détection d'ondes gravitationnelles, aussi compliquée soit-elle, n'est pas une surprise. La relativité générale est fiable et éprouvée depuis de nombreuses années : la plupart des phénomènes étranges prévus par cette théorie ont déjà été observés. Par exemple, les gros objets dévient les rayons lumineux, ce qui décale effectivement la position des étoiles dans le ciel. Ou bien une horloge bat plus vite le tempo en altitude qu'en surface (une information essentielle pour corriger les signaux GPS). Quant aux ondes gravitationnelles elles-mêmes, leur présence avait été repérée en 1978 et saluées par un prix Nobel en 1993 : la rotation de deux pulsars détectés en 1974 et se tournant autour s'accélérait à cause de l'émission d'ondes gravitationnelles entre les deux objets. En revanche, jamais ces ondes n'avaient été ressenties sur Terre. Des rumeurs bruissent déjà sur le fait que LIGO aurait d'autres secousses dans son sac.

S'il ne fait pas de doute qu'un prix Nobel couronnera cette découverte, les noms des lauréats seront difficiles à choisir. L'Américain Rainer Weiss, du MIT, est à l'origine, dans les années 1970, des premières études précises sur les défis à relever pour de futurs instruments. Kip Thorne, charismatique physicien américain, a poussé à la réalisation de LIGO dans les années 1990. Ronald Drever, un Ecossais, a eu l'une des idées-clés permettant d'augmenter la puissance des lasers. Côté européen, le Français Alain Brillet et l'Italien Adalberto Giazotto ont contribué largement aux techniques optiques et mécaniques nécessaires au fonctionnement parfait de Virgo. Et, bien sûr, les porte-parole de LIGO, Gabriela Gonzalez, ou de Virgo, Fulvio Ricci, sont aussi sur les rangs. De quoi secouer encore le landerneau scientifique.



Un réseau mondial

Les observations des deux interféromètres américains LIGO vont être couplées à celles de Virgo, en Italie, à l'été 2016, et Kagra (Japon), qui sera achevé en 2018.

Un siècle d'attente

Albert Einstein par sa double théorie de la relativité restreinte (1905) et générale (1915) a bouleversé les notions intuitives de temps, d'espace et d'énergie.

Selon la première théorie, la description complète et correcte de l'Univers ne doit pas séparer le temps et les positions dans l'espace mais les considérer ensemble : un point dans l'espace-temps est en fait un événement, c'est-à-dire une position attachée à un temps. Le temps absolu n'existe pas. Il dépend des vitesses relatives entre observateurs, par exemple. Une horloge qui se déplace affiche un temps qui s'écoule plus lentement qu'une autre immobile.

Une conséquence de la seconde théorie est que cet espace est structuré par la force de gravitation : les objets lourds courbent l'espace-temps, comme une boule s'enfonce dans un drap tendu. En retour, la structure de l'espace-temps force la matière et la lumière à suivre ses courbes. C'est dans cet espace élastique que nous vivons et que se propagent les ondes gravitationnelles qui distordent les distances, comme le son est une compression de l'air.

Annexe IV

« L'intrication » La source quantique de l'espace-temps 18 novembre 2015 - dans la revue Science

De nombreux physiciens pensent que l'intrication est l'essence de l'étrangeté quantique et certains d'entre eux suggèrent désormais que l'intrication pourrait être aussi la source de la géométrie de l'espace-temps.



Au début de 2009, armé de son audace, d'un esprit ouvert et d'un congé sabbatique, *Mark Van Raamsdonk* a décidé de s'attaquer à l'un des plus grands mystères de la physique : La relation entre la mécanique quantique et la gravitation (*il s'était levé du bon pied*). Après un an de travail et des consultations avec ses collègues, il a envoyé son papier à la revue *High Energy Physics*. En avril 2010, la revue a rejeté son article et l'évaluateur, dans son jugement, a estimé que *Mark Van Raamsdonk* devait arrêter de fumer du cannabis avant d'écrire un papier scientifique. Sa prochaine publication, pour la revue *General Relativity and Gravitation*, n'a pas fait mieux et l'évaluateur a été très cinglant (*pour ne pas être vulgaire*) et le rédacteur en chef de la revue a demandé une réécriture complète de son papier. Par la suite, *Van Raamsdonk* a proposé une version courte de son papier pour un concours annuel d'essais organisé par la *Gravity Research Foundation* au Massachusetts. Non seulement, il a gagné le premier prix, mais il a aussi savouré son ironie. Sa victoire lui garantissait une publication dans la revue *General Relativity and Gravitation* qui a publié son article en juin 2010.

Mais les rédacteurs en chef avaient de bonnes raisons d'être prudents. Le papier de *Mark Van Raamsdonk* concernait ***l'unification de la mécanique quantique et de la gravitation et c'est un problème qui échappe aux physiciens depuis près de 100 ans***. La mécanique quantique gouverne le monde de l'infiniment petit où une particule ou un atome peut se trouver dans de nombreux endroits au même moment. Et cette particule ou atome peut pivoter (*Spin*) dans ou contre le sens des aiguilles d'une montre. La gravitation gouverne le monde de l'infiniment grand allant de la chute d'une personne jusqu'au mouvement des planètes, des étoiles et des galaxies. La gravitation est décrite par la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein qui fête ses 100 ans ce mois. Cette théorie stipule que la gravitation est de la géométrie. Les particules sont déviées lorsqu'elles passent à côté d'un objet massif et ce n'est pas à cause d'une force quelconque, mais parce que l'espace et le temps, autour de l'objet, sont déformés. Les 2 théories ont été vérifiées par d'innombrables expériences, mais les réalités qu'elles décrivent sont incompatibles. Et du point de vue des rédacteurs en chef, la solution de *Van Raamsdonk* était pour le moins étrange. *Van Raamsdonk* estime qu'on a seulement besoin de l'intrication qui est le phénomène ultime de l'étrangeté quantique. Une intrication permet la mesure d'une particule de manière instantanée pour déterminer l'état d'une autre particule associée et c'est valable quel que soit la distance. Vous pouvez mettre 2 particules à chaque extrémité de la Voie lactée, mais l'intrication quantique sera toujours valable.

Einstein répugnait sur l'idée de l'intrication qu'il considérait comme une action terrifiante à distance (*spooky action*). Mais l'intrication est le pilier central de la théorie quantique. Et *Van Raamsdonk*, qui se base sur des travaux de physiciens datant de plus d'une décennie, argue qu'en dépit des objections d'Einstein, ***l'intrication pourrait la base de la géométrie et par conséquent, que l'intrication est la base de la théorie de la gravitation/géométrie d'Einstein***. Selon *Van Raamsdonk*, *l'espace-temps est seulement la structure géométrique sur la manière dont le système quantique est intriqué*.

Cette idée est loin d'être prouvée et ne complète pas la gravité quantique. Mais des études indépendantes ont atteint la même conclusion et cela suscite un intérêt intense chez de nombreux théoriciens. Une petite communauté de physiciens travaille désormais pour étendre la relation entre l'intrication et la géométrie en utilisant les outils modernes pour l'informatique quantique et la théorie quantique de l'information. *Je n'hésiterais pas une minute* selon le physicien *Bartłomiej Czech* de l'université de Stanford en disant que *les connexions entre la théorie quantique et la gravitation, qui ont émergé depuis les 10 dernières années, sont révolutionnaires.*

La gravitation sans la gravitation

Une grande partie de ces travaux se base sur une découverte du physicien *Juan Maldacena* en 1997. La recherche de Maldacena l'a mené à considérer la relation entre 2 modèles de l'univers. Le premier est un cosmos similaire au nôtre. Même s'il ne s'étend pas ou ne se contracte pas (*contrairement à notre vrai univers*), il possède 3 dimensions, il est rempli avec des particules quantiques et il obéit aux équations de la gravitation d'Einstein. On le connaît comme l'espace *anti-de Sitter* même si on le surnomme simplement la **bulle**. Le second modèle de l'univers est également rempli avec des particules quantiques, mais il possède seulement 2 dimensions et il ne possède pas de gravitation. Connue comme la **frontière**, c'est une membrane définie mathématiquement qui s'étend sur une distance infinie à partir de n'importe quel point dans la bulle, mais cette frontière ne le couvre pas totalement. *On peut l'illustrer comme une surface 2D d'un ballon qui couvrirait un volume 3D composé d'air.* Les particules de la frontière obéissent aux équations d'un système quantique connu comme la *Théorie conforme des champs (TCC)*.

Maldacena a découvert que la frontière et la bulle sont totalement équivalentes. Un peu comme les circuits 2D d'un processeur qui encodent l'imagerie 3D d'un jeu vidéo. Les équations, relativement simples de la frontière et qui n'incluent pas la gravitation, contiennent la même information et décrivent les mêmes physiques que les équations qui règnent dans la bulle. *C'est comme un miracle* selon Van Raamsdonk. *Soudainement, la dualité de Maldacena a permis aux physiciens de penser à la gravité quantique dans la bulle sans penser du tout à la gravité.* Ils doivent juste étudier l'état quantique équivalent dans la frontière. Et depuis de nombreuses années, des dizaines de théoriciens explorent cette idée dans le papier de Maldacena et il est aujourd'hui l'un des articles les plus cités en physiques. Et parmi ces enthousiastes, on retrouve notre Van Raamsdonk qui a commencé son congé sabbatique en se posant l'une des questions centrales de la découverte de Maldacena : *Comment un champ quantique dans la frontière produit la gravitation dans la bulle ?* On avait déjà des indices qui pourraient impliquer une sorte de relation entre la géométrie et l'intrication. Mais ces indices ne sont pas très clairs et les premiers travaux s'occupent de cas spécifiques tels que l'univers de la bulle qui posséderait un trou noir.

Aussi, Van Raamsdonk a décidé de s'attaquer au problème et déterminer si la relation est vraie ou que c'est juste une étrangeté mathématique. Il a d'abord considéré un univers-bulle vide qui correspond à un seul champ quantique dans l'univers-frontière. Ce champ, et les relations quantiques qui le maintenaient ensemble contenaient la seule intrication dans le système. Mais Van Raamsdonk s'est demandé ce qui se passerait dans l'univers-bulle si l'intrication de l'univers-frontière était supprimée. Il a pu répondre à cette question en utilisant des outils de mathématiques qui ont été introduits en 2006 par *Shinsei Ryu* de l'université de l'Illinois et *Tadashi Takanagi* de l'université de Kyoto. Leurs équations ont permis à Van Raamsdonk de modéliser une réduction méthodique et lente de l'intrication dans l'univers-frontière pour voir la réaction dans l'univers-bulle. Dans ce dernier, il a vu que l'espace-temps s'étirait jusqu'à un point de déchirement. *Si on réduisait l'intrication à zéro, alors cela fractionnerait l'espace-temps en morceaux déconnectés comme un chewing-gum qu'on aurait étiré jusqu'au point de rupture.*

Van Raamsdonk a réalisé que la relation géométrique/intrication était générale. L'intrication est l'ingrédient essentiel qui unit l'espace-temps dans un ensemble harmonieux alors qu'on pensait que cela concernait des cas exotiques comme les trous noirs. Van Raamsdonk a déclaré : *Je pense que j'ai compris quelque chose concernant une question fondamentale que personne n'a comprise auparavant.* Plus précisément : *Qu'est-ce que l'espace-temps ?*

Einstein et l'intrication

Son idée est *de considérer l'intrication quantique comme une colle géométrique* et c'est l'essence de son papier qui a été rejeté et de son essai qui avait gagné le concours. Et cette idée de colle géométrique résonne de plus en plus chez les physiciens. On n'a encore trouvé aucune preuve rigoureuse et l'idée est toujours une conjecture, mais de nombreux raisonnements indépendants supportent aujourd'hui la colle géométrique.

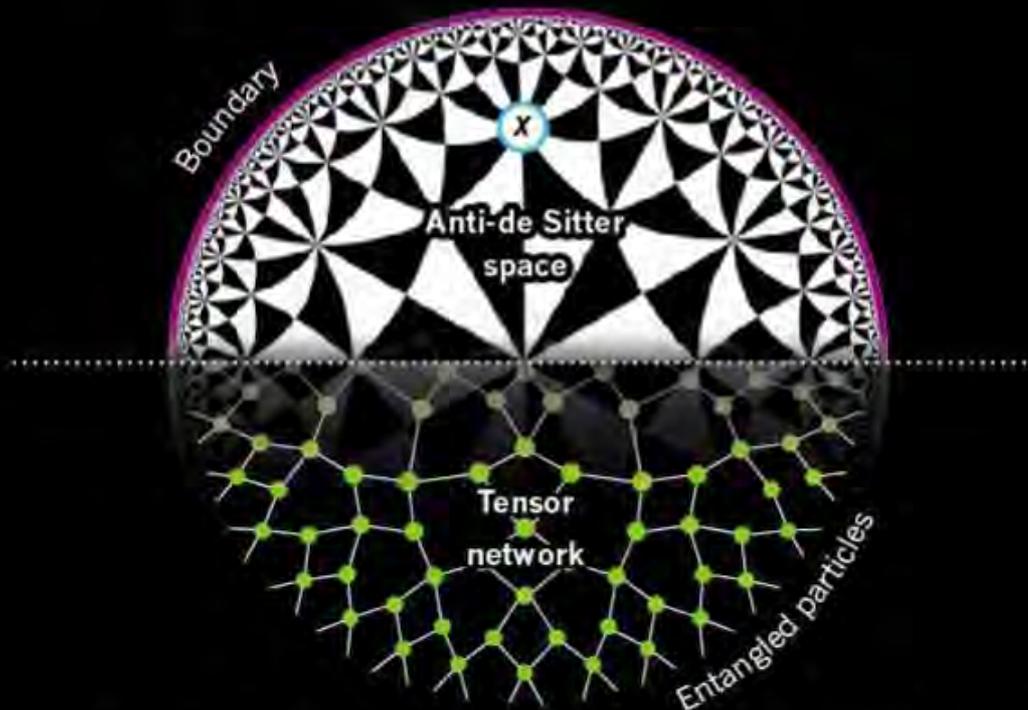
En 2013, Maldacena et *Leonard Susskind* de Stanford ont publié une conjecture appelée **ER = EPR** en l'honneur des fameux papiers de 1935. ER, par Einstein et *Nathan Rosen*, un physicien israélo-américain, ont introduit ce qu'on connaît aujourd'hui comme un *trou de ver*. Le trou de ver est un tunnel dans l'espace qui connecte 2 trous noirs. Notons qu'aucune particule ne peut voyager avec un trou noir (*en dépit de ce qu'on voit dans les films de science-fiction*), car il faudrait voyager plus vite que la vitesse de la lumière ce qui est impossible. EPR, par Einstein et le physicien américain Boris Podolsky, était le premier papier qui décrivait clairement ce qu'on connaît aujourd'hui comme *l'intrication*.

La conjecture de Maldacena et de Susskind est que ces 2 concepts étaient bien plus liés que les dates de publication de leurs papiers. Si l'une des deux particules est connectée par l'intrication, alors elles sont liées par un trou de ver. Et l'inverse est également possible. La connexion connue comme le trou de ver est équivalente à l'intrication. Ce sont différentes manières de décrire la même réalité sous-jacente. Personne n'a une idée claire de cette réalité sous-jacente. Mais les physiciens sont de plus en plus convaincus qu'elle existe. Maldacena, Susskind et d'autres ont testé l'hypothèse ER = EPR pour voir si elle est mathématiquement consistante avec toutes les choses qu'on connaît sur l'intrication et le trou de ver et la réponse est oui.

La connexion de l'intrication

Le phénomène quantique connu comme l'intrication serait l'élément qui permet à l'espace de se comporter comme un espace homogène.

Dans un modèle infini de l'univers connu comme l'anti-de Sitter, les effets de la gravitation sur n'importe quel point x à l'intérieur sont mathématiquement équivalents à un champ quantique dans la frontière. On peut visualiser cet univers en 2D en le remplissant avec des triangles. Même si les triangles sont identiques, ils semblent déformés quand ils s'approchent de la frontière.



Les physiciens ont noté que ce Pattern ressemble aux diagrammes appelés réseaux Tensor qui ont été inventé pour montrer les relations entre des particules quantiques à grande échelle. Ces connexions sont connues comme une intrication quantique.

C'est quoi, une intrication quantique ?

En 1935, Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen (EPR) ont découvert qu'il y a une connexion qui existe entre des systèmes quantiques séparés. La mesure de l'un des systèmes détermine l'état de l'autre.

Exemple :

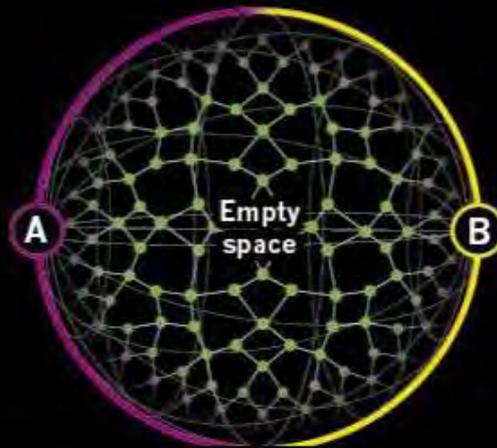


Spins intriqués : Si une particule pivote vers le haut, alors l'autre particule pivotera vers le bas et vice-versa.

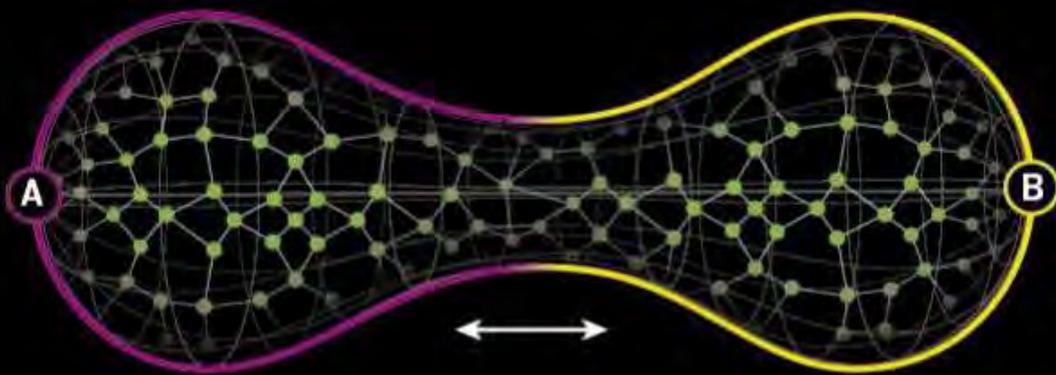
L'observation d'une particule révèle instantanément l'état de l'autre particule.

Désintrication

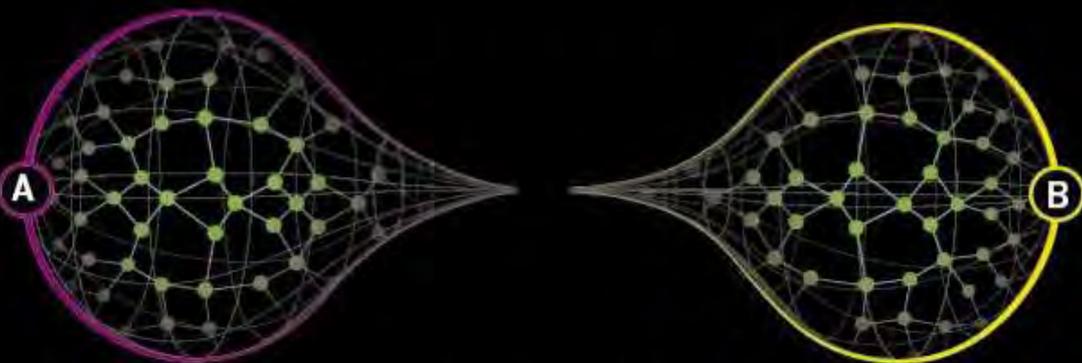
La correspondance frontière-bulle implique que l'espace à l'intérieur est composé d'intrication quantique autour de l'extérieur.



Même quand l'univers-bulle est vide, les champs quantiques dans n'importe quel des 2 régions (A et B) sont fortement intriqués l'un avec l'autre.



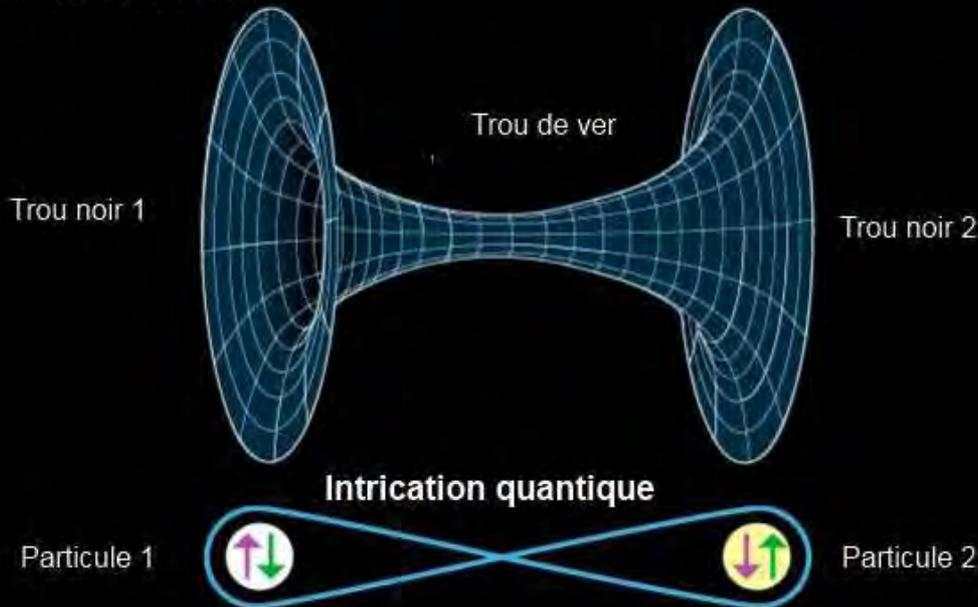
Si on réduit l'intrication entre ces 2 régions, alors l'univers-bulle commence à se fractionner.



Quand l'intrication est réduite à zéro, alors l'univers-bulle se divise en 2. Cela prouve que l'intrication est nécessaire pour l'espace puisse exister.

ER = EPR

Toujours en 1935, Einstein et Rosen (ER) ont démontré que des trous noirs séparés pouvaient être connectés par un tunnel via l'espace-temps et on connaît ce tunnel comme un trou de ver.



Les physiciens soupçonnent que la connexion dans le trou de ver et la connexion de l'intrication quantique sont la même chose, mais sur des échelles très différentes. En dehors de leur taille, il n'y a aucune différence.

Des connexions cachées

D'autres domaines supportent aussi une relation géométrie-intrication et on peut citer les physiques de matière condensée et la théorie de l'information quantique. Ce sont des domaines où l'intrication joue déjà un rôle important. Cela a permis aux chercheurs de ces disciplines d'attaquer la gravitation quantique avec de nouveaux concepts et d'outils mathématiques. Les *réseaux Tensor*, par exemple, sont une technique utilisée par les physiciens de matière condensée pour détecter les états quantiques d'une grande quantité de particules subatomiques. *Brian Swingle* les a utilisés de cette manière en 2009 lorsqu'il était un doctorant au MIT pour calculer comment les groupes d'électrons interagissent avec des matériaux solides. Il a découvert que le réseau le plus utile était de lier les paires d'électrons adjacents qui avaient le plus de chance d'interagir l'un avec l'autre plutôt que lier de grands groupes dans un pattern qui ressemble à un arbre généalogique. Mais ensuite, pendant un cours sur la théorie du champ quantique, Swingle a appris la correspondance bulle-frontière de Maldacena et il a noté un pattern intrigant : La cartographie entre la bulle et la frontière était la même que dans le réseau sous forme d'arbre généalogique.

Swingle s'est demandé si cette ressemblance était plus que de la simple coïncidence. Et en 2012, il a publié des calculs démontrant qu'il y avait autre chose. Il a atteint la même conclusion que Van Raamsdonk et cela a renforcé l'idée d'une géométrie-intrication. *Vous pouvez penser à l'espace comme étant construit à partir d'intrications* selon Swingle. Il voit que les réseaux Tensors sont de plus en plus utilisés pour explorer la correspondance géométrie-intrication.

Un autre exemple est la théorie des *codes correcteurs d'erreurs quantiques*. Ces derniers ont été inventés par les physiciens pour construire des ordinateurs quantiques. Ces machines encodent l'information dans des qubits tels qu'un Spin haut ou bas d'un électron et ces qubits peuvent prendre des valeurs de 1 et de 0 simultanément. En principe, quand des qubits interagissent et sont correctement intriqués, alors un tel appareil quantique pourrait faire des calculs qu'un ordinateur classique ne pourrait jamais finir même s'il fonctionnait pendant toute l'existence de l'univers. Mais en pratique, le processus est très fragile. La moindre perturbation de l'extérieur va déranger l'intrication délicate des qubits et détruire la possibilité d'un calcul quantique. Et c'est cette fragilité qui a inspiré des codes correcteurs d'erreur quantique. Ce sont des stratégies numériques qui corrigent les corrélations corrompues entre les qubits et améliorent la robustesse du calcul. Et la signature de ces codes est qu'ils ne sont jamais locaux. L'information, qui a besoin d'être restaurée, doit se propager sur de grandes distances. Autrement, le dommage sur un seul point pourrait détruire tout espoir de restauration. Et c'est cette non-localité qui fascine de nombreux théoriciens de l'information quantique lorsqu'ils voient la correspondance entre la frontière et la bulle de Maldacena, car ils y voient la même non-localité. L'information qui correspond à une petite région de la bulle est propagée sur une vaste région de la frontière.

Si on regarde l'AdS-CFT, alors tout le monde peut voir une vague analogie à un code correcteur d'erreur quantique selon Scott Aaronson, un informaticien du MIT. Mais dans des travaux publiés en juin 2015, des physiciens menés par Daniel Harlow de l'université d'Harvard et John Preskill du California Institute of Technology avancent quelque chose de plus solide. **Que la dualité de Maldacena est elle-même un code correcteur d'erreur.** Et ils l'ont démontré avec un simple modèle mathématique et désormais, ils tentent de prouver leur théorie de manière plus générale. *On dit depuis des années que l'intrication est importante pour l'émergence de la bulle selon Harlow. Mais pour la première fois, je pense qu'on commence à s'approcher du comment et du pourquoi.*

Au-delà de l'intrication

Et cela suscite beaucoup d'intérêt, car la fondation Simons, une organisation philanthropique à New York a annoncé en aout 2015 qu'elle fournirait 2,5 millions de dollars par année pour au moins 4 ans afin d'aider les chercheurs à progresser dans la connexion entre la gravitation et l'information quantique. *La théorie de l'information fournit un moyen puissant pour structurer notre pensée dans les physiques fondamentales* selon Patrick Hayden, un physicien de Stanford qui dirige le programme de la fondation Simons. Il ajoute que *cette aide va supporter 16 principaux chercheurs dans 14 institutions dans le monde ainsi que des étudiants, des postdocs et une série d'ateliers.* L'objectif final est de construire un dictionnaire compréhensif pour traduire les concepts géométriques en langage quantique et vice-versa. Cela permettrait aux physiciens de compléter la théorie de la gravitation quantique.

Mais les chercheurs font toujours face à de nombreux obstacles. Le premier est que la correspondance bulle-frontière ne s'applique pas à notre univers. Ce dernier s'étend et il semble infini. La plupart des chercheurs dans ce domaine pensent que les calculs, en utilisant la correspondance de Maldacena, sont pertinents sur le vrai univers, mais il n'y a pas encore de consensus sur comment traduire les résultats d'un régime à l'autre.

Un autre défi est la définition standard de l'intrication qui fait référence à des particules à un moment donné. Une théorie complète de la gravitation quantique devra ajouter du temps à l'image d'ensemble. *L'intrication est une grande pièce du puzzle, mais ce n'est pas le puzzle* selon Susskind. Ce chercheur pense que les physiciens doivent embrasser un autre concept provenant de la théorie de l'information quantique qui est la **complexité algorithmique**. Cette dernière est le nombre d'états ou d'opérations logiques qui sont nécessaires pour construire l'état quantique d'un système. Un système avec une faible complexité est similaire à un ordinateur quantique qui aurait des qubits à quasiment zéro. Et on peut construire facilement ce type de machine. La machine avec une complexité élevée est similaire à une série de qubits encodant un nombre qui nécessiterait des siècles de calcul.

Susskind a commencé à penser à la complexité algorithmique il y a 10 ans quand il a noté qu'une solution aux équations d'Einstein de la relativité générale permettait à un trou de ver, dans l'espace Ads, d'aller de plus en plus loin à mesure que le temps passe. Et il s'est demandé sur la correspondance dans la frontière. Cela ne pouvait pas être une intrication, car les corrélations, qui produisent l'intrication entre différentes particules sur la frontière, atteignent leur maximum en moins d'une seconde. Dans un article de 2014, Susskind et Douglas Stanford de l'Institute for Advanced Study ont montré qu'en fonction de la progression du temps, l'état quantique sur la frontière varierait exactement de la manière que celle qui est prévue par la complexité algorithmique.

Il apparaît de plus en plus que le développement de l'intérieur d'un trou noir est la même chose que le développement de la complexité algorithmique selon Susskind. Si l'intrication quantique soude ensemble les pièces de l'espace, alors la complexité algorithmique pourrait mener le développement de l'espace et amène l'élément insaisissable du temps. Une conséquence potentielle, qu'il commence à explorer, serait un lien entre le développement de la complexité algorithmique et l'expansion de l'univers. Les parties internes d'un trou noir sont des régions où la gravité quantique semble dominer et la complexité algorithmique pourrait avoir un rôle central pour compléter la théorie de la gravitation quantique.

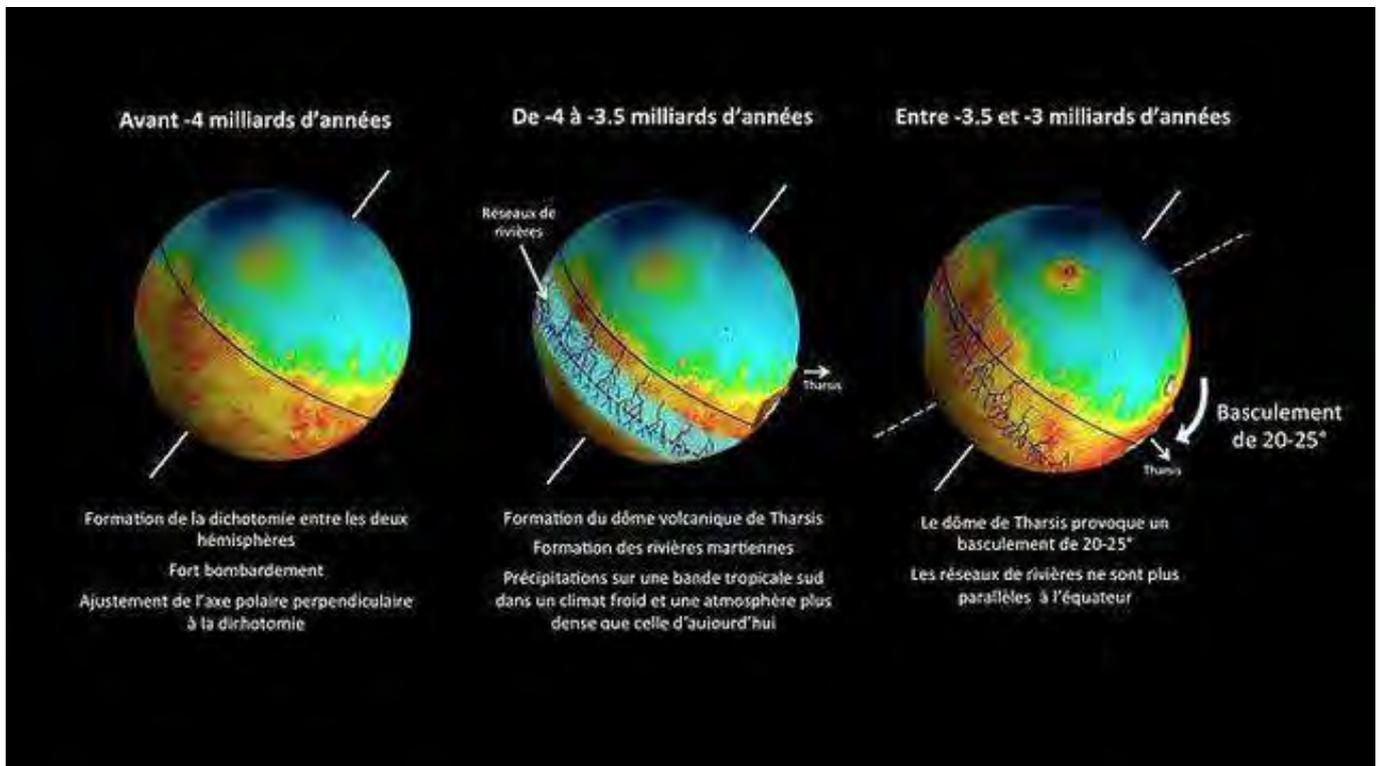
Et en dépit de ces obstacles, la plupart des chercheurs estiment qu'ils ont commencé à pointer vers quelque chose d'extrêmement réel et important. *Avant, j'ignorais la composition de l'espace* selon Swingle. *On ignorait même si la question avait un sens. Mais il est évident que cette question a désormais un sens et nous avons même la réponse. L'espace est fait d'intrications.* Et pour Van Raamsdonk, qui a écrit plus de 20 papiers sur l'intrication quantique depuis 2009, vous serez ravi d'apprendre qu'ils ont tous été publiés et que personne ne fait plus référence à une utilisation intensive du Cannabis.

Annexe V

1) Mars : comment un volcan géant a fait basculer la planète rouge

La surface de Mars a basculé de 20 à 25 degrés

Si un tel basculement se produisait sur la Terre, Paris se retrouverait sur le cercle polaire



La formation du dôme de Tharsis, mastodonte grand comme la France, aurait fait glisser la surface de Mars de 20 à 25 degrés autour de son noyau, il y a 3 à 3,5 milliards d'années, selon une étude publiée dans *Nature*. Serait-ce la clé de quelques mystères martiens ?

Mars n'est plus ce qu'elle était. Non, il ne s'agit pas de l'eau de la planète rouge... Cette fois, les scientifiques se sont penchés sur la physionomie même de Mars, qui aurait été modifiée radicalement il y a 3 à 3,5 milliards d'années. La planète a basculé, sa surface a glissé autour de son noyau déplaçant rivières, calottes glacières et volcans. Et justement, un volcan gigantesque serait à l'origine de cette transformation qui expliquerait certains des grands mystères de la planète rouge.

Le coupable : le dôme de Tharsis

Il s'agit du dôme volcanique de Tharsis, un géant dix mille fois plus massif que le plus grand volcan terrestre (le volcan Mauna Loa à Hawaï) et presque de la taille de la France. Alors que Mars est huit fois moins volumineuse que la Terre. "Le dôme de Tharsis est énorme, démentiel par rapport à la taille de Mars", souligne Sylvain Bouley, géomorphologue (expert des reliefs) à l'Université Paris-Sud et coauteur de l'étude publiée mercredi dans *Nature*. La formation de cette "anomalie" a débuté il y a plus de 3,7 milliards d'années et l'activité volcanique s'est poursuivie pendant plusieurs centaines de millions d'années jusqu'à former un plateau de plus de 5000 km de diamètre, d'environ 12 km d'épaisseur en moyenne et pesant 1 milliard de milliards de tonnes (1/70e de la Lune). Selon l'étude, par sa masse hors du commun, le dôme volcanique a entraîné la rotation des enveloppes superficielles de Mars (sa croûte et son manteau) autour de son noyau, un peu comme si l'on faisait tourner la chair d'un abricot autour de son noyau.

"Paris se retrouverait sur le cercle polaire"

Résultat : la surface de Mars a basculé de 20 à 25 degrés. "Si un tel basculement se produisait sur la Terre, Paris se retrouverait sur le cercle polaire. On verrait des aurores boréales en France et on ferait du vin au Maghreb ou au Soudan", illustre Sylvain Bouley. Dans le cas de Mars, cette donnée pourrait donc être la clé de quelques mystères, comme le tracé des lits d'anciennes rivières. "On n'arrivait pas à comprendre pourquoi les rivières sont là où elles sont actuellement. Elles donnent l'impression d'être placées de façon un peu aléatoire, mais si on bascule la surface, toutes les rivières se retrouvent sur une même bande tropicale", précise-t-il. Les scientifiques s'interrogeaient également sur l'endroit où se trouvent certains réservoirs souterrains de glace, qualifiés jusqu'ici d'anomalie car ces emplacements sont inexplicables. Mais voilà, avant le basculement, les pôles étaient ailleurs. En opérant le glissement, on ramène deux des calottes glacières sur les pôles. "Tout s'imbrique parfaitement", note le géomorphologue.

"Mais il reste beaucoup de questions en suspens, cette histoire est passionnante !" Est-ce le basculement qui est à l'origine de l'arrêt du champ magnétique puis de la disparition de l'atmosphère. Ou de la fin de l'activité fluviale ? Compte tenu de cette étude, "désormais, quand on s'intéressera à l'époque primitive de Mars, pour chercher des traces de vie ou d'un océan, par exemple, il faudra apprendre à penser avec cette nouvelle géographie".



Le nouveau visage de la jeune planète Mars. C'est ce à quoi la planète Mars devait ressembler il y a 4 milliards d'années, d'après cette nouvelle étude. Les pôles étaient à des endroits différents, les pluies dans une bande tropicale méridionale ont créé des réseaux de rivières et des volcans actifs ont permis au dôme de Tharsis de grossir, inclinant de ce fait la surface martienne après l'arrêt de l'activité fluviale (il y a 3,5 milliards d'années).

2) Mars : son atmosphère a disparu... et autres découvertes depuis 25 ans

Depuis les années 90, les découvertes scientifiques sur Mars se sont accélérées, attestant notamment la présence d'eau. Jeudi, la Nasa affirme qu'une partie de l'atmosphère a disparu à cause des éruptions du soleil. Rappel des faits en images.

Une nouvelle découverte scientifique sur Mars. La Nasa révèle ce jeudi soir, grâce aux premiers résultats de la sonde *Maven*, que les éruptions solaires pourraient avoir provoqué la disparition d'une grande partie de l'atmosphère, dans la jeunesse de la planète rouge.

Il reste plus d'oxygène que l'on croyait

Etant donné la probabilité que ces éruptions devaient se produire plus fréquemment dans l'enfance du système solaire, ces chercheurs suggèrent que les taux d'échappement dans l'espace des particules formant l'atmosphère de Mars étaient largement liés à cette activité du soleil. Durant les explorations de *Maven*, les instruments ont détecté une importante variation de température selon les altitudes, ainsi que des mélanges stables de CO₂, d'argon et d'oxyde nitreux. Ils ont aussi mesuré des quantités d'oxygène plus grandes qu'estimées précédemment. Une troisième étude avec *Maven* a montré une aurore boréale à une basse altitude de seulement 60 km, très similaire à celles observées sur la Terre, une observation sans précédent. Un phénomène lumineux spectaculaire provoqué par l'interaction entre les particules ionisées des vents solaires et l'atmosphère. Ces nouveaux enseignements rejoignent tous ceux des 25 dernières années, où les scientifiques ont considérablement enrichi leurs connaissances au sujet de Mars.

25 ans de découvertes marquantes

La sonde *Mars Pathfinder*, lancée par la Nasa en 1996, était la première mission d'une agence spatiale vers Mars à connaître le succès depuis... 1971. Avec son robot à six roues *Sojourner* embarqué (le tout premier à se promener à la surface) elle a principalement analysé l'atmosphère, le climat et la géologie de la planète rouge. La sonde a aussi et surtout permis de confirmer un principe qui sera réutilisé: il est bien possible de se poser sur cet astre avec des coussins gonflables, sorte d'airbags qui ont amorti son impact.

L'orbiteur *Mars Global Surveyor*, lancé la même année, s'est concentré sur les mesures de l'atmosphère de Mars. Il a réalisé une cartographie précise de sa surface, mettant d'ailleurs en évidence 9 ans plus tard des traces géologiques de ce qui pourrait être un écoulement antérieur d'eau dans deux cratères. Pendant ce temps, la Nasa lance en 2005 *Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)* avec une mission assez similaire, pour prendre la relève. Elle réussira à estimer le volume des calottes glacières aux pôles.

La présence de glace confirmée en 2008

En 2003 sont lancés deux rovers jumeaux à six roues, *Spirit* et *Opportunity*. Leur terrain d'étude a été repéré par l'orbiteur *2001 Mars Odyssey* lancé deux ans plus tôt. Ils découvrent que l'eau, à l'état liquide, a bien existé dans le passé. La même année, l'Agence spatiale européenne (ESA) a mis en orbite la sonde *Mars Express*, qui larguera le robot *Beagle*. Ils révéleront un passé volcanique récent, la présence d'aurores polaires ou encore une cartographie du satellite naturel Phobos. L'eau, cette fois à l'état solide, est une autre découverte de première importance. Ce sera en 2008 avec la sonde *Phoenix*, posée directement par la Nasa près du pôle Nord de la planète rouge. Elle y confirme la présence de glace.

La présence d'eau liquide prouvée en 2014

Mais la star actuelle de Mars est le robot *Curiosity*, lancé en 2011 avec une mission ambitieuse jusqu'ici pleine de succès, orientée vers des indices de la possibilité d'une vie. Outre une exploration inédite de la géologie avec des images impressionnantes, l'appareil de 900 kg détecte de nombreux indices d'une brique essentielle à cela: l'eau à l'état liquide aujourd'hui sur Mars. Surprise, la découverte récente la plus frappante viendra toutefois... de l'orbiteur *MRO*, toujours autour de la planète depuis 2006: il a rapporté les preuves d'un écoulement d'eau salée, annoncé par la Nasa en septembre dernier. Ce qui avait, en quelque sorte, volé la vedette à *Curiosity*.

Table des matières

Préambule	1
I La préhistoire	4
A) Le cercle de Goseck et le disque de Nebra	5
B) Le site de Nabta Playa	7
C) Stonehenge.....	9
D) Carnac	16
E) Kokino	17
F) Angkor Wat.....	17
II L’astronomie de l’Antiquité	20
A) Dans le bassin méditerranéen	20
1 Egypte	20
2 Mésopotamie.....	34
3 La Grèce et Rome	38
B) Hors du bassin méditerranéen.....	50
1 L’astronomie de l’Inde.....	50
2 L’astronomie des amérindiens	51
3 L’astronomie chinoise.....	52
III Le Moyen-Âge	55
A) L’astronomie de l’Europe médiévale.....	55
B) L’astronomie arabe	56
C) Les échanges entre ces deux civilisations	75
IV La Renaissance (XV° - XVI° siècles)	77
A) Nicolas Copernic.....	77
B) Tycho Brahe.....	80
C) Giordano Bruno	86
V L’âge de raison – la révolution scientifique (XVII° siècle)	92
A) Johann Bayer.....	92
B) Galilée	92
C) Johannes Kepler.....	109
D) Christian Huyghens.....	114
E) Jean-Dominique Cassini	115
F) Isaac Newton.....	116
G) Edmund Halley	127
VI Le siècle des Lumières (XVIII° siècle)	133
A) Charles Messier.....	133
B) Joseph-Louis Lagrange	134
C) William Herschel	137
D) Pierre François André Méchain	138
E) Pierre-Simon de Laplace.....	139
VII Le XIX° siècle	147
A) Urbain Jean Joseph Le Verrier.....	149
B) Un événement : L’éruption solaire de 1859	154

VIII L'époque moderne	156
A) Le XX ^e siècle.....	156
1 Max Planck	156
2 Albert Einstein	159
3 Edwin Powell Hubble	169
4 Clyde William Tombaugh.....	173
5 Résumé : de la Belle Époque à l'entre-deux guerres	175
6 Résumé : L'après-guerre et les débuts de la radioastronomie	175
7 Inventaire chronologique 1937-2000.....	176
8 Résumé : Les années 1970.....	180
9 L'exploration du cosmos et les sondes spatiales	180
10 Les années 1980 et 1990	181
11 Découverte des exoplanètes	182
12 Gerard Peter Kuiper	182
13 Jan Hendrik Oort.....	183
14 Stephen Hawking.....	183
B) Le XXI ^e siècle	188
1 Inventaire chronologique 2000-2016.....	188
2 Quelques points essentiels 1900-2016.....	190
a) Connaissance des galaxies.....	190
b) Théorie des quanta.....	191
c) La relativité.....	191
d) La ceinture de Kuiper / Le nuage de Oort	191
e) La conquête spatiale	191
f) La découverte du fonds diffus cosmologique.....	191
g) Les sondes et/ou atterrisseurs planétaires.....	192
h) Connaissance de Mars	193
i) Les télescopes spatiaux et les gros télescopes terrestres	193
j) Les exoplanètes	193
k) Les comètes	195
l) La vérification de la découverte de la matière noire	195
m) Laniakéa	195
n) Cohabitation des théories des quanta et de la Relativité : l'intrication	197
o) Confirmation de l'existence des ondes gravitationnelles	197
IX Iconographie.....	198
A) Préhistoire	198
B) Antiquité et Moyen-Âge	204
C) Renaissance.....	205
D) XVII ^e siècle	207
E) XVIII ^e siècle.....	209
F) XIX ^e siècle.....	210
G) XX ^e siècle	211
Annexe I : Origine des noms des étoiles	213
Annexe II : Les lois de Kepler.....	214
Annexe III : Les ondes gravitationnelles	217
Annexe IV : L'intrication.....	221
Annexe V : Mars.....	227
Table des matières :	230-231