

de la Terre est incliné et le plan de son équateur n'est pas dans le plan de l'écliptique ; on nomme obliquité de l'écliptique l'angle de l'axe de la Terre et de la normale au plan de l'écliptique.

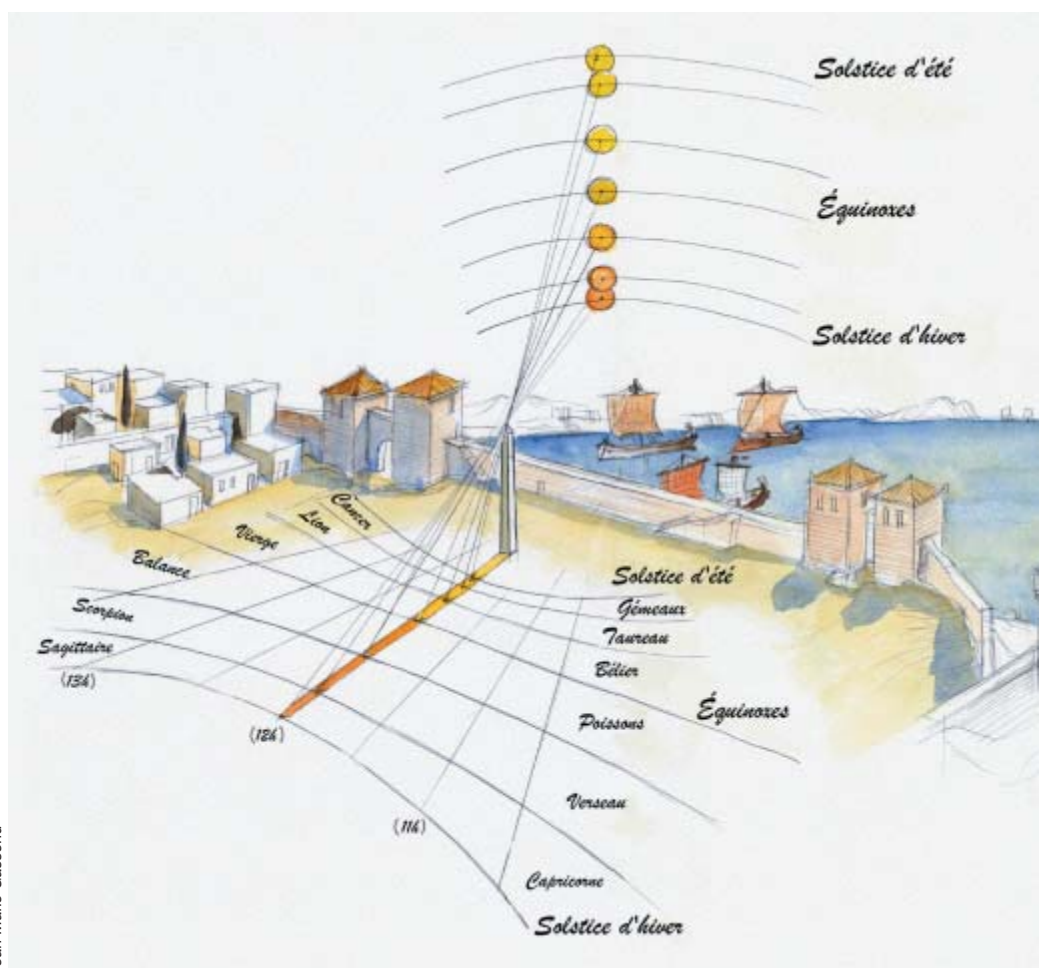
Peut-être les Chaldéens et les Égyptiens avaient-ils déjà repéré ces constellations, ces «maisons», où le Soleil vient successivement se loger au cours des 12 mois zodiacaux, observation délicate puisque Soleil et étoiles ne sont pas visibles simultanément. La description des 12 constellations du zodiaque situées sur l'écliptique reste encore imprécise, mais l'inclinaison générale, l'obliquité, de ce cercle écliptique par rapport à l'équateur est déjà connu des pythagoriciens : 1/15 de la circonférence (soit 24°). L'obliquité de l'écliptique est la différence de hauteur du Soleil au méridien entre le jour du solstice et celui de l'équinoxe. Une mesure plus précise, 11/166, (soit 23,8°), apparaîtra bientôt sous la plume d'Ératosthène. En 1817, l'astronome Delambre a montré que l'obliquité n'a pu être mesurée qu'avec un gnomon, et que Pythéas a sans doute été le premier à la mesurer.

Le gnomon, un ingénieux dispositif

Le gnomon était connu depuis Anaximandre, au VI^e siècle avant notre ère, et les Grecs, selon Hérodote (V^e siècle avant notre ère), en avaient appris l'usage des Babyloniens. Pythéas utilise un obélisque et, grâce à la longueur de son ombre, mesure la hauteur du Soleil, c'est-à-dire l'angle le Soleil au-dessus de l'horizon. Un quadrillage effectué sur un sol plan bien perpendiculaire au gnomon donnait immédiatement, heure, date et saison (voir la figure 3).

Les astronomes grecs connaissaient avec précision la durée de l'année : 365 jours 1/4. Hipparque précisa même plus tard $365 + 1/4 - 1/300$ (365,247). Chose extraordinaire et plus difficile encore, ils savaient même repérer, à l'aide d'un gnomon, le début des saisons : les dates des équinoxes de printemps et d'automne, lorsque la durée du jour est égale à celle de la nuit, ainsi que les dates des solstices, quand la trajectoire du Soleil reste la même d'un jour à l'autre.

L'astronome grec Euctémon (V^e siècle avant notre ère) avait découvert les durées inégales des quatre saisons (la plus longue était alors le printemps), et



Jean-Marie Gassend

3. UN OBSERVATOIRE DE L'ANTIQUITÉ : la pièce maîtresse, le gnomon, sert tout à la fois de cadran solaire, de calendrier des quatre saisons et de calendrier des 12 mois zodiacaux. L'obélisque, le gnomon lui-même, devait avoir une dizaine de mètres de hauteur. Selon la hauteur du Soleil à midi, l'ombre s'allonge sur la ligne méridienne. Chaque jour, l'extrémité de l'ombre décrit une courbe différente : la ligne centrale correspond aux jours d'équinoxes, les deux hyperboles extrêmes correspondent aux solstices et les hyperboles intermédiaires délimitent les 12 mois zodiacaux. On a indiqué les heures en nomenclature moderne, mais, en fait, le jour était divisé en 12 heures et la nuit en 12 heures également, de sorte que 11 heures correspondait à la cinquième heure et midi à la sixième heure.

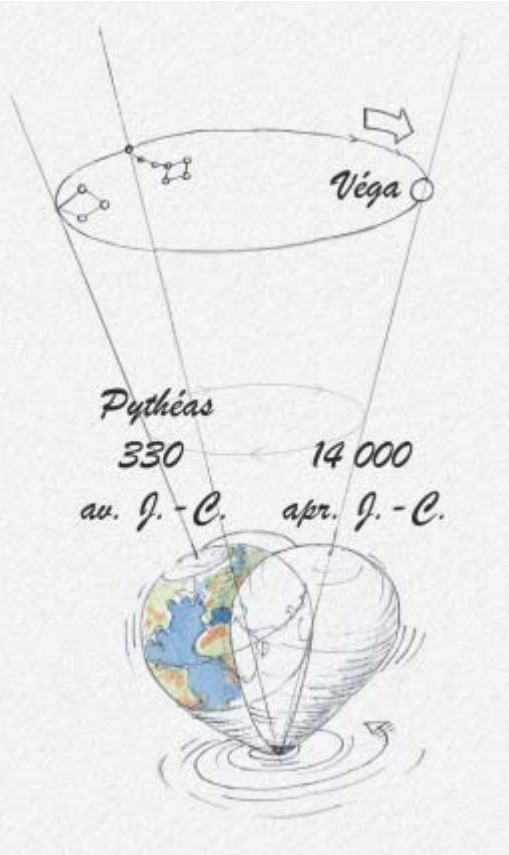
Callipe (IV^e siècle avant notre ère) venait même de mesurer leur durée avec une précision meilleure qu'une journée. Comment Pythéas aurait-il pu effectuer des mesures aussi précises de la longueur de l'ombre aux solstices et aux équinoxes s'il n'avait su déterminer lui-même ces quatre dates critiques, préambule à ces mesures ?

La première étape de la construction de tout observatoire consiste à tracer la ligne méridienne (la direction Nord-Sud) ; il suffit de tracer la bissectrice de l'angle dessiné par les deux directions, pour lesquelles les longueurs de l'ombre du gnomon sont identiques, c'est-à-dire entre deux positions du Soleil à la même hauteur au-dessus de l'horizon, par exemple l'une au Sud-Est observée deux, trois ou quatre heures avant le passage au méridien et l'autre symétrique au Sud-Ouest, deux, trois ou quatre heures

après. Cette ligne méridienne donne chaque jour l'heure vraie de midi, l'heure du Soleil.

Comme les astronomes de tous les siècles, Pythéas devait observer le ciel tous les jours de l'année. Dès que le temps était propice, il pouvait repérer le déplacement de l'extrémité de l'ombre. Celle-ci est toujours minimale à midi, mais les courbes décrites sur le sol sont chaque jour différentes.

Au printemps et en été, l'ombre est plus courte, et les courbes sont concaves. La première de ces courbes, la plus proche du pied du gnomon, indique le jour du solstice d'été. Les jours d'équinoxe, l'extrémité de l'ombre décrit, en milieu de journée, une ligne droite sur le sol. Grâce à cette propriété, Pythéas pouvait déterminer ces deux dates particulières. En automne et en hiver, les lignes décrites au sol se courbent dans



Jean-Marie Gassend

4. LA PRÉCESSION DES ÉQUINOXES : la Terre tourne comme une toupie, avec deux mouvements. Elle effectue un tour autour de son axe en 24 heures et, en même temps, son axe décrit sur le ciel, en sens inverse et en 26 000 ans, un cône dont l'angle au sommet est égal à 23,5°. À l'époque de Pythéas, l'axe de la Terre était dirigé vers un endroit vide d'étoiles ; aujourd'hui, il est dirigé vers l'étoile alpha de la Petite Ourse ; un jour, il pointera vers Véga.

l'autre sens. L'ombre s'allonge chaque jour davantage jusqu'au jour du solstice d'hiver, représenté par la dernière courbe, la plus éloignée du gnomon.

Pythéas a dû se rendre compte que ces courbes journalières se prolongeaient en direction des levers et des couchers du Soleil, selon les asymptotes de ces courbes qui sont, en fait, des hyperboles. Les propriétés mathématiques de ces courbes (comme celles des paraboles et des ellipses) seront décrites un siècle plus tard dans *Les coniques*, traité d'Apollonios de Pergé.

Les archéologues n'ont pas retrouvé trace à Marseille de cet observatoire astronomique, mais si l'on en croit l'astronome Cléomède, Pythéas disposait d'un gnomon d'une hauteur considérable. En revanche, à Rome, la terrasse d'origine de l'*Horologium* d'Auguste a été mise au jour, et l'on y a retrouvé des graduations et des courbes en bronze, incrustées dans le sol de la terrasse, preuves de la fonction astronomique oubliée de cet obélisque égyptien du VI^e siècle avant notre ère.

Le gnomon de Pythéas mesurait-il 21 mètres comme ce monument de pres-

tige ? Pas nécessairement. La hauteur ajoute peu à la précision des mesures. En effet, le Soleil (dont le diamètre apparent est égal à un demi-degré) donne une ombre dont la limite s'estompe dès que la hauteur dépasse quelques mètres.

On peut imaginer l'observatoire de Pythéas avec un gnomon d'une dizaine de mètres de hauteur, dressé sur une esplanade horizontale bien dégagée, d'environ 60 mètres d'Est en Ouest et de 30 mètres du Nord au Sud, recouverte de dalles de pierre sur lesquelles l'astronome pouvait graver ses mesures. Ainsi que l'indique Strabon, le gnomon était gradué en 120 divisions, chacune d'elles subdivisée en cinq parties.

Dès lors, on peut déduire le cheminement de Pythéas. Il remarque qu'à l'équinoxe, l'ombre se déplace, du jour au lendemain, de quatre divisions sur la ligne méridienne. La veille et le lendemain des solstices, le déplacement de l'ombre est imperceptible, mais 15 jours avant les solstices et 15 jours après, Pythéas constate un déplacement quotidien de une division ; dès lors, en prenant la date médiane, il peut connaître le jour précis du solstice d'été. Pour déterminer la date des équinoxes, Pythéas peut repérer directement les deux jours (printemps et automne) où l'ombre se déplace en ligne droite, mais il peut aussi surveiller à quelle date l'ombre vient se projeter sur la ligne méridienne selon la bissectrice des angles formés par les directions extrêmes des solstices d'été et d'hiver.

Strabon et Pline nous livrent de nombreuses mesures de la longueur de l'ombre : « Le jour de l'équinoxe, la hauteur du gnomon est à la longueur de son ombre de 5 à 3 à Alexandrie, de 11 à 7 à Carthage, de 4 à 3 à Athènes, de 1 à 8/9 à Rome, l'ombre est égale au gnomon à Venise... » Ces mesures, effectuées à l'équinoxe, fournissent des latitudes géographiques à deux ou trois degrés près. Pourtant, elles ne nécessitent ni la construction d'un observatoire ni les longues années d'expérience d'un astronome. Bref, elles sont banales. Strabon ne cite même pas leurs auteurs. Pourtant, il ne manque pas de nommer Pythéas, Ératosthène et Hipparque, même s'il conteste vivement leurs conclusions qui viennent bouleverser son modèle géographique d'un monde habité entouré d'océans en continuité, et contredire sa théorie des latitudes et des climats.

Paradoxalement, c'est Strabon lui-même qui nous rapporte la mesure

de la longueur de l'ombre effectuée par Pythéas à Marseille : « Le gnomon est avec son ombre, le jour du solstice d'été, dans le rapport de cent-vingt à quarante et un et quatre cinquièmes. » Des écrits perdus de Pythéas, Strabon sauve ainsi cette donnée astronomique fondamentale, mesure à trois chiffres significatifs, qui a permis aux astronomes des temps modernes de connaître quelle était, en ce temps-là, l'obliquité de l'écliptique.

Les caprices de l'inclinaison de la Terre

Cette mesure de l'inclinaison de l'axe de la Terre a fait l'objet d'un grand débat scientifique entre les astronomes qui s'imaginaient que cet angle était constant et ceux qui pensaient qu'il pouvait varier au cours des siècles. Plus de 1 000 ans après Pythéas, les astronomes arabes de Bagdad et de Tolède ont mesuré à leur tour l'inclinaison de l'axe de la Terre. Pour eux, l'angle était plus petit : 23°35', en 880, selon Al Battani ; 23°33'30", en 1080, selon Arzachel. À la Renaissance, d'autres astronomes ont renouvelé ces mêmes mesures : 23°30'10", en 1580, selon Tycho Brahe ; 23°29'28", en 1590, selon Kepler. L'angle semblant sans cesse diminuer, un doute s'est installé. Les astronomes les plus éminents, voulant vérifier cet angle dans les mêmes conditions, sont venus répéter à Marseille l'observation de Pythéas. Avec un gnomon de 17 mètres de hauteur, 89 238 divisions verticales, la longueur de l'ombre est égale à 23°28'53", en 1636, selon Peiresc et Gassendi.

J.-D. Cassini, à Marseille, La Hire et Fontenelle, à Paris, Lemonnier, à Saint-Sulpice, et Flamsteed, à Greenwich, vérifiant cette mesure, ne furent pas convaincus d'un changement. L'enjeu se révélait important. Une nouvelle mesure, réalisée en 1716 par Louville, indiquait que l'angle d'inclinaison de la Terre avait encore diminué. L'Académie des sciences restait sceptique. La diminution était infime : 47 secondes d'angle par siècle.

S'agissait-il d'une oscillation périodique entre deux valeurs limites ? D'un basculement continu et irréversible de l'axe de la Terre qui entraînerait un bouleversement climatique catastrophique ? L'explication est enfin arrivée au XVIII^e siècle : le mathématicien Euler démontra que la force exercée par les grosses planètes Jupiter et Saturne était