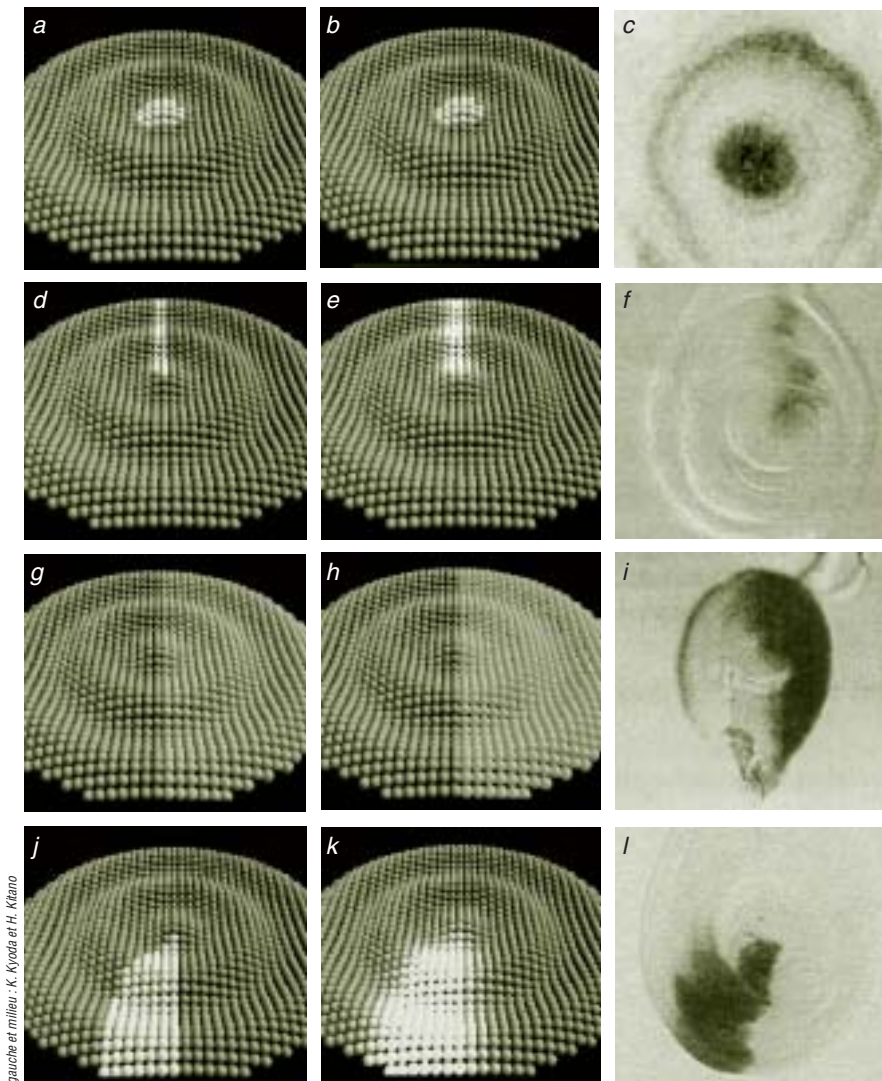




gauche et milieu : K. Kyoda et H. Kitano

A droite, de haut en bas : G. Campbell et al., W. Brook et S. Cohen, S. Eaton et T. Kornberg et M. Zecca et al.

8. LA MODÉLISATION DU DISQUE IMAGINAL d'une patte de drosophile permet de caractériser la zone d'expression de divers gènes (à gauche, en blanc) et la zone où les protéines sont synthétisées (au centre, en blanc). Les simulations concordent avec les résultats obtenus expérimentalement (à droite ; les zones noires sont celles où la protéine est présente). Les gènes étudiés sont, de haut en bas, *aristaless* (a, b et c), *decapentaplegic* (d, e et f), *engrailed* (g, h et i) et *wingless* (j, k et l).

est un répresseur du gène *decapentaplegic* concorde avec les résultats expérimentaux.

Des séries de simulations ont montré que l'axe proximal-distal résulte directement de la diffusion des produits des gènes *wingless* et *decapentaplegic*. L'équipe de H. Kitano a ainsi échafaudé un nouveau modèle, dit bipolaire, dans lequel la diffusion des protéines *wingless* et *decapentaplegic* agit sur la segmentation du disque en anneaux : ces protéines diffusent à partir de leur zone de synthèse et sont de moins en moins concentrées à mesure qu'on s'éloigne. À partir des zones de synthèse, on peut tracer des lignes d'isoconcentration. Les intersections des lignes d'isoconcentration en protéine *wingless* et des lignes d'isocon-

centration en protéine *decapentaplegic* forment une série de cercles concentriques : l'ensemble des lignes d'isoconcentration découpe le disque imaginal en anneaux ; chacun donnera naissance à une partie de patte.

Wayt GIBBS est journaliste à la revue *Scientific American*.

Koji KYODA et Hiroaki KITANO, *Simulation of genetic interaction for drosophila leg formation*, in *Proceedings of Pacific Symposium on Biocomputing*, 1999.

Drew ENDY, Lingchong YOU, John YIN et Ian MOLINEUX, *Computation, prediction and experimental tests of fitness for bacteriophage T7 mutants with permuted genomes*, in *Proceedings of National Academy of Science*, vol. 97, n° 10, pp. 5375-5380, 2000.

Ainsi, le modèle, fondé sur des résultats expérimentaux, a permis de trancher parmi plusieurs hypothèses, d'une part, sur le rôle de la protéine *cubitus interruptus* et, d'autre part, sur la formation de l'axe proximal-distal. Rappelons que le premier objectif de ces modèles biologiques n'est pas d'obtenir une prévision parfaite, mais plutôt une approximation fiable de la réalité.

La biologie virtuelle sera de plus en plus utilisée, notamment pour la mise au point, dans un proche avenir, des modèles de fonctionnement de différents types cellulaires, par exemple les cellules du cœur ou encore les lymphocytes B, des acteurs essentiels du système immunitaire.

D'ici une dizaine d'années, ces modèles constitueront un incroyable moteur pour la découverte de nouveaux médicaments. On pourra modéliser les conséquences cellulaires d'une maladie et, ensuite, observer comment agit un médicament ou une molécule en cours d'évaluation. Nous disposerons de modèles quantitatifs du fonctionnement d'une cellule, d'un organe, voire d'un organisme entier.

Aujourd'hui, la biologie semble être dans la situation de l'astronomie du XVI^e siècle. Les astronomes disposaient alors d'innombrables données sur les positions des objets célestes, mais ils ne pouvaient pas prédire avec précision le mouvement des planètes. Ils n'avaient pas encore compris que les orbites sont elliptiques et décrites par une équation simple... jusqu'à ce que Kepler le démontre.

Il n'existe sans doute pas une unique équation simple qui expliquerait toute la biologie cellulaire, mais les biologistes recherchent des principes unificateurs afin d'agencer les données et de parvenir à une compréhension globale des systèmes. La prochaine révolution biologique sera-t-elle informatique ?

Jeremy EDUARIOS, Rafael IBARRA et Bernhard PALSSON, *In silico prediction of Escherichia coli metabolic capabilities are consistent with experimental data*, in *Nature Biotechnology*, vol. 19, pp. 125-130, 2001.

Jean-Arcady MEYER et Agnès GUILLOT, *La robotique évolutionniste*, in *Pour la Science*, n° 284, juin 2001.

Drew ENDY et Roger BRENT, *Modeling Cellular Behaviour*, in *Nature*, vol. 409, pp. 391-395, 18 janvier 2001.

Le 15 janvier 2009,
découvrez le **nouveau site**
de **Pour la Science !**
www.pourlascience.fr

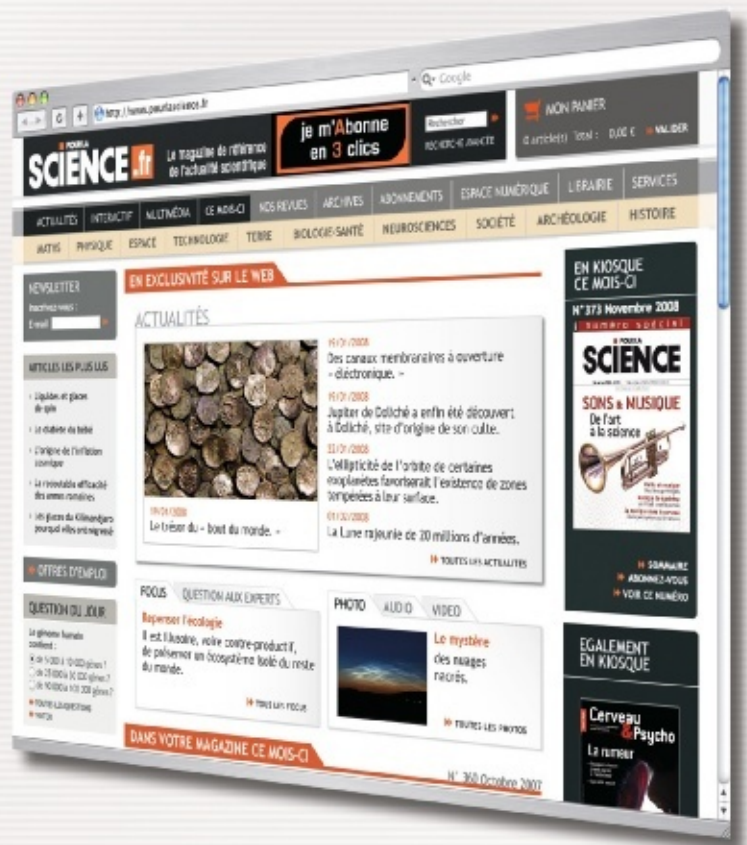
Avec son nouveau site Internet, Pour la Science vous offre plus de contenu, plus de services, plus d'interactivité.

➤ Vous êtes abonné à Pour la Science ?
Retrouvez l'intégralité de votre magazine en ligne et téléchargez les articles de votre choix. Réagissez aux articles et posez vos questions à des experts. Découvrez chaque jour des contenus inédits.

➤ Vous n'êtes pas encore abonné à Pour la Science ?
Découvrez chaque jour des actualités scientifiques, des articles originaux, des photos, des vidéos...
Achetez les articles de votre choix.

➤ Abonnez-vous en ligne en trois clics !
L'abonnement « papier » vous donne accès au magazine imprimé et à tous les contenus web.
L'abonnement « web » vous donne accès à votre magazine au format numérique.

➤ Et bientôt l'accès en intégralité aux archives !



En cadeau de bienvenue pour le lancement de **www.pourlascience.fr**,
et jusqu'au 25 janvier 2009, abonnez-vous en ligne au tarif exceptionnel
de 41 € pour l'abonnement web, et de 48 € pour l'abonnement
au magazine imprimé + web.

À bientôt sur **POUR LA SCIENCE.fr**

Pythéas, explorateur grec

YVON GEORGELIN • FRANÇOIS HERBAUX

Grand explorateur, Pythéas a atteint des contrées polaires, où il a observé qu'au solstice d'été, le Soleil ne se couche pas. Ses relevés astronomiques et ses mesures géographiques, des latitudes et des distances terrestres, par exemple, sont remarquablement précis.

Qualifié de Christophe Colomb des contrées nordiques par Winston Churchill, l'astronome explorateur grec Pythéas (IV^e siècle avant notre ère), contemporain d'Aristote et d'Alexandre le Grand, a conté une expédition extraordinaire. Les contes étranges dans des pays imaginaires sont fréquents dans la littérature grecque des siècles qui précèdent notre ère, et certains accueillent les récits de Pythéas avec méfiance. Comment le croire lorsqu'il affirme que, dans l'océan, la mer monte, puis se retire, et que ces marées sont liées à la position et aux phases de la Lune ? Surprenant pour qui n'a jamais quitté les rives de la Méditerranée !

Comment admettre que le Soleil ne se couche plus lorsqu'on atteint les hautes latitudes ? Comment imaginer que, dans ces régions de l'extrême Nord, la mer se transforme en masse gélatineuse où l'on ne peut ni marcher ni naviguer ? Comment croire que la mer Baltique est fermée, alors que l'on pensait que le monde habité était entouré d'eau de toutes parts, ce qui suppose la continuité de l'océan ? Comment croire, enfin, que des gens puissent vivre sous le cercle arctique, alors que la théorie géographique des climats et des latitudes affirmait que cela était impossible ?

Si Ératosthène (III^e siècle avant notre ère) comprend les « preuves » astronomiques rapportées par Pythéas, Polybe, et Strabon à sa suite (I^{er} siècle avant notre ère), historiens et géographes renommés, affirment de façon péremptoire que Pythéas a trompé son monde. Pour eux, c'est « le plus menteur des hommes ». À la Renaissance, quelques astronomes érudits retrouvent l'œuvre oubliée de Pythéas. Ils l'étudient, l'analysent et sont persuadés que son expédition lointaine a bien eu lieu.

Quelques auteurs récents, prenant des libertés avec les textes et puisant dans la richesse de leur érudition, voire de leur imagination, ont largement enjolivé l'aventure de Pythéas, allant jusqu'à tenter de combler les lacunes de l'histoire en

1. PARTI DE MARSEILLE, Pythéas a navigué sur l'océan Atlantique. Remontant vers le Nord, il a découvert l'Islande (la lointaine Thulé) et a atteint la banquise. Il a fait de nombreux relevés astronomiques grâce à un gnomon (l'obélisque, au centre).

Jean-Marie Gassend

prêtant à cet astronome des motivations économiques ou géopolitiques, telle la recherche de routes maritimes de commerce, voire de conquête militaire.

L'aventure arctique de ce Marseillais du IV^e siècle avant notre ère tient-elle de l'histoire ou de la légende? Relève-t-elle de la science ou du mythe? Aujourd'hui, on sait que ces routes étaient déjà fréquentées : on a montré que les bateaux massaliotes de cette époque étaient capables de naviguer au long cours ; les archéologues ont retrouvé des pièces de monnaie massaliotes de l'époque de Pythéas en Cornouailles, sur la route de l'étain, et des monnaies grecques près de la mer Baltique, sur la route de l'ambre.

Que sait-on réellement de Pythéas? Ses écrits traitent d'astronomie et de géographie. L'auteur y soulève des questions relatives à la position du pôle céleste, au phénomène des marées ou encore aux mesures des latitudes de l'Europe du Nord. En outre, quelques éléments permettent d'entrevoir les grandes lignes d'une expédition maritime. On y reconnaît le détroit de Gibraltar (les colonnes d'Hercule), la péninsule armoricaine, la Grande-Bretagne,

l'Islande (la mystérieuse Thulé, où le Soleil ne se couche pas) et la Baltique.

De l'ouvrage de Pythéas, *De l'Océan, Voyage autour de la Terre*, il ne nous est parvenu qu'une quarantaine de fragments et de mentions littéraires. Ces rares vestiges ne permettent nullement de reconstituer dans sa continuité l'itinéraire de son «mystérieux» voyage. L'expédition se composait-elle d'un seul ou de plusieurs navires? Y eut-il un seul ou plusieurs périples? Combien de saisons furent nécessaires? Où hiverna-t-il? Dans quel sens Pythéas navigua-t-il autour de cette grande île britannique, en triangle, dont il révèle le périmètre (40 000 stades) et la position en latitude? Les textes que nous possédons encore n'apportent aucune réponse.

Alors, que reste-t-il? Une modeste mission d'exploration, qui, peut-être, ne nécessitait qu'un équipage minimal et un bateau solide. Cela correspondrait assez bien à la prudence et à la modestie supposées de Pythéas, à son sens de la mesure. Cela aussi pourrait même répondre au doute de l'historien Polybe : «Il est invraisemblable



qu'un simple particulier, un homme sans ressources, ait parcouru de telles distances à la fois sur mer et sur terre.» Pythéas, comme les Massaliotes lettrés de son temps, devait parler le grec et le celté. Pour l'aider dans sa navigation, il fit vraisemblablement appel à des marins autochtones sillonnant les mers sur des bateaux de commerce ou de pêche, embarqués au hasard des escales et l'emmenant toujours plus loin vers le Nord, vers le Soleil de minuit (voir la figure 2). Au contact des indigènes Pythéas approfondit la question des marées et recueillit de précieuses informations astronomiques : «Les Barbares lui montrèrent la couche du Soleil.»

La découverte des îles «Prettaniques» par Pythéas fait de lui l'un des grands explorateurs de l'histoire. Son expédition septentrionale jusqu'à l'île de Thulé est bien connue des peuples du Nord de l'Europe, mais pourquoi s'est-il aventuré dans les brumes arctiques? Sans doute pour y trouver la confirmation de ses connaissances astronomiques : tout au Nord, il existe une région où le Soleil ne se couche pas l'été et ne se lève pas l'hiver. Il devait le voir de ses propres yeux et le faire observer par ses marins, pour revenir en persuader ses concitoyens!

Nous considérons ce voyage comme la toute première expédition scientifique connue, une expédition de savant, comparable à celles de Bougainville ou de La Pérouse. Le frère aîné de Bougainville, résume ainsi les qualités du Massaliote : «Habile astronome, ingénieux physicien, géographe exact, hardi navigateur, ses voyages ont contribué à perfectionner la connaissance du globe terrestre.»

Il est vrai qu'avant d'être écrivain, voire navigateur, Pythéas a sa place au Panthéon de l'astronomie. D'ailleurs, les astronomes n'ont-ils pas donné son nom à un cratère lunaire? Dans leurs travaux, les plus brillants observateurs et calculateurs du ciel des temps anciens et modernes se sont appuyés sur les observations astronomiques de Pythéas, ainsi que sur ses mesures des latitudes et des caractéristiques de la Terre.

Puisque la Terre est ronde

Qu'un savant marseillais de cette époque soit ainsi unanimement reconnu par ses pairs ne doit guère étonner. La science grecque du IV^e siècle héritait d'un solide fonds de connaissances astronomiques. Depuis les pythagoriciens, au V^e siècle avant notre ère, tous les astronomes savent que la Terre est ronde. Lors d'une éclipse de Lune, les pythagoriciens

avaient observé que l'ombre de la Terre projetée sur la Lune forme un arc de cercle : que l'éclipse ait lieu au levant, au méridien ou au couchant, l'ombre dessine toujours le même arc de cercle. C'était bien la preuve que la Terre est une sphère et non un disque circulaire. Autre preuve : des voyageurs remontant au Nord de la mer Noire avaient vu des étoiles devenir circumpolaires et, descendant vers l'Égypte, d'autres avaient découvert une très belle étoile, Canopus, invisible d'Athènes.

À l'époque de Pythéas, les astronomes grecs savent même mesurer la dimension de la Terre par simple arpentage entre deux points dont on connaît les latitudes. Dans son ouvrage *De Caelo*, Aristote rapporte la première mesure de la circonférence terrestre : 400 000 stades (le stade olympique mesure quelque 185 mètres, soit environ 74 000 kilomètres), distance, certes, surévaluée de près de 85 pour cent, mais qui donne pourtant l'ordre de grandeur de la Terre.

Pythéas devait connaître ces résultats, et il calcule qu'à la latitude 66,5 degrés, au solstice d'été, le Soleil ne se couche pas. Sans doute, fut-il, lui aussi, tenté de mesurer la Terre : les latitudes mesurées à Marseille, dans les Îles britanniques et à Thulé, et les journées de mer parcourues vers le Nord depuis son départ le lui permettaient. Des éléments de cette mesure nous sont parvenus, mais pas le résultat final.

Une deuxième mesure de la Terre (300 000 stades) sera rapportée au III^e siècle avant notre ère par Archimède, dans l'*Arénaire*. Toutefois, nous ignorons si elle s'appuie sur les distances parcourues par Alexandre en Égypte, ou sur celles de Pythéas vers le Nord. Une troisième mesure (250 000 stades) nous vient d'Ératosthène. Elle se déduit de la distance entre Syène et Alexandrie. Cette mesure est passée à la postérité, notamment en raison de sa précision exceptionnelle (40 000 kilomètres), mais elle ne doit pas pour autant occulter les premières tentatives.

Plinie attribue la découverte de l'obliquité de l'écliptique à Anaximandre (VI^e siècle avant notre ère), successeur de Thalès à l'École d'Ionie. La Terre tourne autour du Soleil dans le plan de l'écliptique, matérialisé par les 12 constellations du zodiaque (de la Terre, on observe le Soleil, au cours de l'année, successivement dans ces 12 constellations). De surcroît, l'axe



Jean-Marie Gassend

2. LE SOLEIL DE MINUIT À THULÉ, au solstice d'été. Selon Pythéas : «Dans ces lieux, le Soleil s'étant couché, [...] Il se relevait aussitôt.»

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.

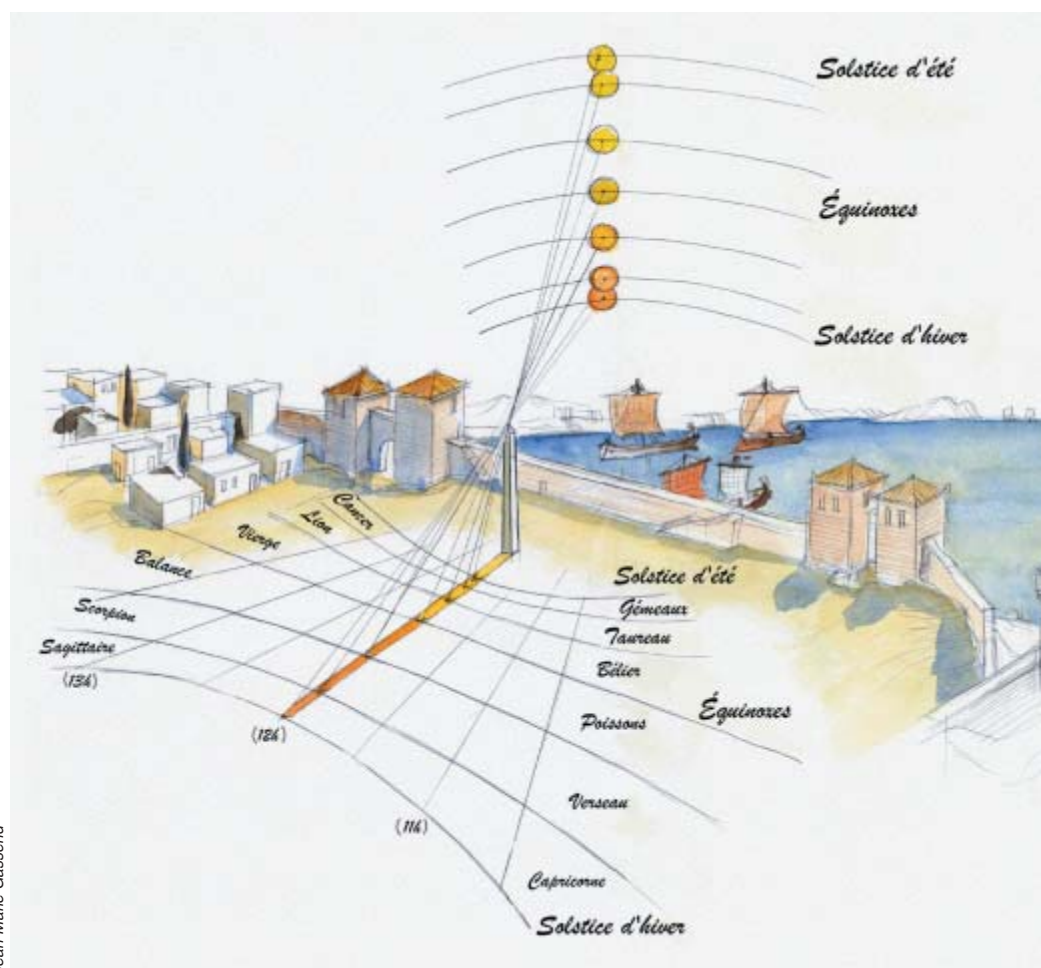
Peut-être les Chaldéens et les Égyptiens avaient-ils déjà repéré ces constellations, ces «maisons», où le Soleil vient successivement se loger au cours des 12 mois zodiacaux, observation délicate puisque Soleil et étoiles ne sont pas visibles simultanément. La description des 12 constellations du zodiaque 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



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.

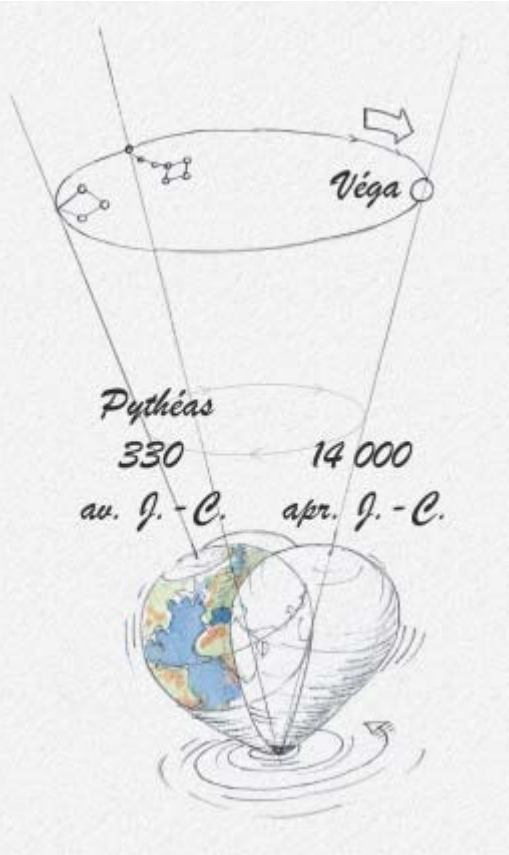
Callipe (IV^e siècle avant notre ère) venait même de mesurer leur durée avec une précision meilleure qu'une journée. Comment Pythéas aurait-il pu effectuer des mesures aussi précises de la longueur de l'ombre aux solstices et aux équinoxes s'il n'avait su déterminer lui-même ces quatre dates critiques,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

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

suffisante pour perturber l'orbite de la Terre. De son côté, l'astronome Laplace calcula l'effet de ces forces perturbatrices, et, rendant hommage à Pythéas, démontra qu'à l'époque du savant marseillais, l'inclinaison de l'axe de la Terre était bien de $23^{\circ}46'$. Pythéas avait raison!

Les calculs de la mécanique céleste concluent aujourd'hui que l'inclinaison de l'axe de la Terre varie entre 22° et $24,5^{\circ}$ au cours d'une période de 40 000 ans. Cette oscillation est à l'origine d'un cycle climatique qui a été confirmé par l'examen des dépôts glaciaires stratifiés depuis 150 000 ans sur 2 200 mètres d'épaisseur.

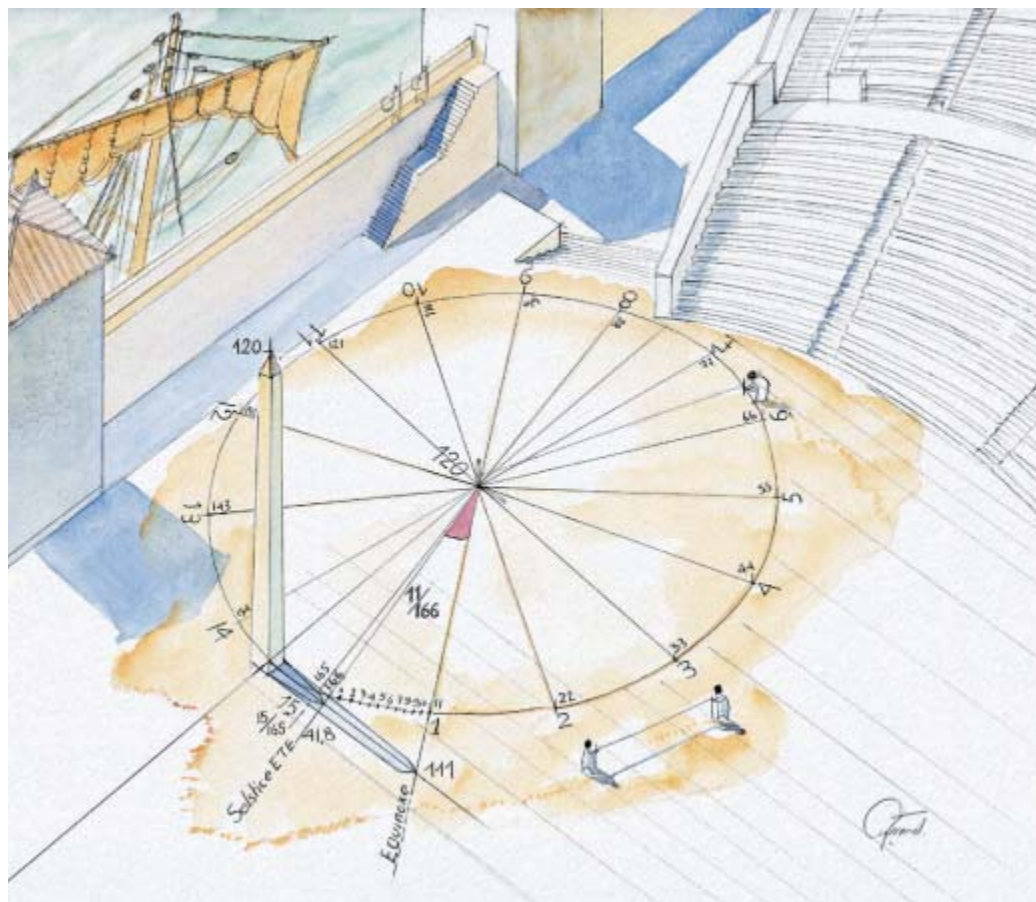
Les pythagoriciens avaient mesuré l'obliquité de l'écliptique par rapport à l'équateur céleste : $1/15$ de la circonférence. Eudoxe (IV^e siècle avant notre ère) et Aristote ont adopté cette valeur. Ératosthène, suivi par Hipparque et Ptolémée (II^e siècle de notre ère), a utilisé une valeur plus précise : $11/83$ ($11/83$ est la double-obliquité comptée du solstice d'été au solstice d'hiver, soit $11/166$ pour l'obliquité). D'où peut bien provenir ce nombre 83? Comment a-t-il été mesuré?

Au XVII^e siècle, l'astronome Riccioli écrivit qu'Ératosthène divisait les cercles en 83 parties (un nombre premier). Cette affirmation irréfléchie lui attira une critique polie de Jean-Baptiste Delambre dans son ouvrage *Histoire de l'astronomie ancienne*. Pour sa part, Delambre, sans grande conviction, tenta d'expliquer ce nombre curieux comme le résultat d'un calcul. Selon lui, Ératosthène aurait mesuré un angle de $47^{\circ}40'$, soit $47^{\circ}2/3$; or $47^{\circ}2/3/360 = 143/1080 = 11 \times 13/1080 = 11/(83 + 1/13)$. Cela conduit «assez naturellement» à la valeur $11/83$ si l'on néglige au dénominateur la fraction décimale $1/13$!

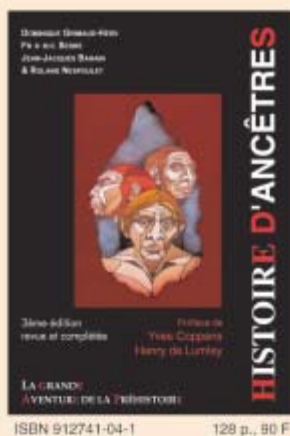
Delambre connaissait la difficulté de ce type de mesures qui doivent forcément être effectuées en deux temps, à plusieurs mois d'intervalle. Toutes les tentatives faites au XIX^e siècle pour mesurer la parallaxe des étoiles, à six mois d'intervalle, par rapport à des cercles mobiles, avaient échoué. Delambre en était conscient. Avec raison, il souligne le silence de Ptolémée sur la méthode qu'aurait utilisée Ératosthène. Il ne manque pas non plus d'émettre des réserves sur la précision de la méthode. Comme lui, on peut conclure que «l'intervalle entre les tropiques n'a pu être mesuré qu'à l'aide d'un gnomon», seul instrument stable au cours du temps et capable d'une

mesure mémorisée, gravée sur le sol. Ératosthène, à qui l'on attribue le résultat final de $11/166$, avait lu l'ouvrage *Peri Oceanos* de Pythéas, qu'il cite fréquemment et qu'il utilise pour sa géographie. Pourtant, Ératosthène qui était à la fois directeur de la bibliothèque d'Alexandrie et précepteur de Ptolémée Philopator, n'aura consacré probablement qu'une partie de son temps aux observations astronomiques. Il avait acquis une solide réputation en mathématiques, en astronomie, en géographie, en musique, en philosophie, en philologie et en littérature! Il y gagna par la suite les surnoms de *Bêta* et de *Pentathlos*, signifiant qu'il n'était que le second dans chacun de ces nombreux domaines. Nous pensons qu'Ératosthène a probablement utilisé les résultats de Pythéas qui avait l'expérience scientifique nécessaire et disposait d'un gnomon, instrument idéal pour cette mesure.

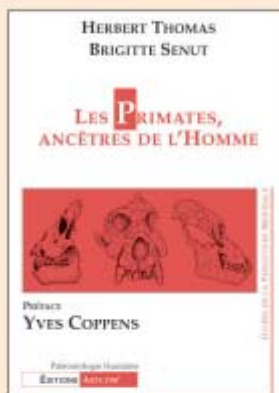
L'obliquité de l'écliptique est la différence de hauteur du Soleil au méridien entre le jour du solstice et celui de l'équinoxe. Pour mesurer cet angle situé dans le plan méridien, Pythéas a probablement l'astuce de rabattre ce plan vertical sur le sol, où sont consignées ses mesures. Le gnomon est divisé en 120 parties égales (voir la figure 5). La pointe du gnomon se projette alors sur une ligne Est-Ouest, à 120 divisions du pied du gnomon. Pythéas trace sur le sol un cercle, dont le rayon est égal à 120 divisions et qui passe par le pied du gnomon. Il joint le centre de ce cercle aux deux points qui avaient été repérés et qui représentent, l'un l'ombre au solstice d'été et l'autre, l'ombre à l'équinoxe. Cet angle, matérialisé sur le sol, est l'obliquité de l'écliptique. Grâce à sa méthode de projection, il peut désormais en mesurer aisément la valeur.



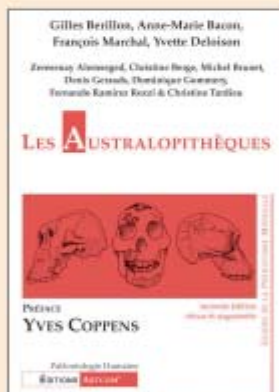
5. LA MÉTHODE GRAPHIQUE DE PYTHÉAS : il partage en 120 divisions la hauteur de l'obélisque, dont l'ombre se projette sur la ligne méridienne à une distance égale à 111 divisions le jour de l'équinoxe et à 41 divisions et $4/5$ (41,8) le jour du solstice d'été. Pour évaluer cet angle, Pythéas trace un cercle dont le rayon est égal à 120 divisions et qui passe par le pied du gnomon. Pythéas prend une corde dont la longueur est celle de la corde qui sous-tend l'angle (en rouge) formé par la pointe du gnomon au solstice d'été et à l'équinoxe. Il reporte la longueur de sa corde 15 fois sur le cercle, mais il lui reste un résidu. Il prend ce résidu comme nouvelle corde unité et constate qu'il peut la reporter 11 fois pour obtenir l'angle qu'il cherche à mesurer et 166 fois pour faire le tour de la circonférence. L'angle étudié mesure $11/166$ et correspond à l'obliquité de l'écliptique.



ISBN 912741-04-1 128 p., 80 F



ISBN 912741-22-X 184 p., 90 F



ISBN 912741-21-1 256 p., 90 F



ISBN 912741-07-6 344 p., 230 F



Ni Pythéas ni les astronomes grecs, ne connaissaient les fonctions trigonométriques ; ils étaient contraints de procéder par méthode graphique pour exprimer la valeur de l'angle enregistré. À l'époque de Pythéas, la circonférence était divisée en 12 signes du zodiaque, 30 degrés pour chaque signe ; plus tard, Ératosthène divisera la circonférence en 60 parties et Hipparque en 360 degrés ; Hypsiclès les subdivisera en 60 minutes, chacune en 60 secondes. Les Grecs ne connaissaient pas non plus les nombres décimaux : ils utilisaient les nombres entiers, les quantités et les fractions.

Pour exprimer la valeur de l'angle qu'il a enregistré sur le sol, en fraction de circonférence, Pythéas définit une corde, celle que sous-tend l'angle de l'obliquité de l'écliptique. Sur le cercle tracé au sol, il reporte sa corde autant de fois qu'il lui est possible : 15 fois. Il lui reste un petit résidu, puisque l'angle mesuré est légèrement inférieur à 24°. Nous pensons que Pythéas a pris alors la corde sous-tendue par cet angle résidu comme nouvelle corde-unité. Ainsi construite, il reporte la corde résidu 11 fois pour couvrir l'angle de l'obliquité de l'écliptique et 166 fois pour parcourir toute la circonférence. L'obliquité de l'écliptique est ainsi égale à 11/166 de la circonférence, et la double-obliquité à 11/83. Le nombre «83» apparaît bien comme le résultat d'une méthode graphique, il ne se déduit ni d'un calcul algébrique ni de la lecture d'un cercle gradué. L'énigme semble résolue à l'avantage de Pythéas.

L'une des plus belles découvertes astronomiques de Pythéas, qui lui valut l'éloge d'Hipparque, est l'observation du pôle céleste, point imaginaire situé dans le prolongement de l'axe de la Terre et autour duquel semblent tourner toutes les étoiles. Cette ancienne mesure est précieuse, elle aussi, car elle nous permet de connaître la configuration du ciel au IV^e siècle avant notre ère.

L'axe de la Terre est aujourd'hui dirigé vers d'autres constellations. En effet, la Terre tourne comme une toupie, avec deux mouvements : elle effectue un tour en 24 heures et, en même temps, son axe décrit, en sens inverse sur le ciel et en 26 000 ans, un cône dont l'angle au sommet est égal à 23,5°. C'est la précession des équinoxes (voir la figure 4).

Pour dresser la carte des étoiles proches du pôle céleste, Pythéas utilise sûrement la pointe de son gnomon,

repère fixe dont la silhouette vient, au clair de lune, se découper sur le ciel. Au point de visée situé au Sud du gnomon, Pythéas a dû dresser une lucarne, une grille, derrière laquelle il sera venu, d'heure en heure, repérer les arcs de cercles décrits par les étoiles voisines du pôle (voir la figure 6). Pythéas profite vraisemblablement de la lueur d'une nuit de pleine lune pour distinguer en même temps la grille, la pointe du gnomon et les étoiles les plus brillantes. Une longue nuit d'hiver lui permet d'observer pendant 12 heures d'affilée le demi-cercle parcouru sur cette grille par l'ombre des étoiles circumpolaires. Le pôle céleste est au centre de ce cercle.

Pas d'étoiles au pôle

Dans ses *Commentaires*, Hipparque rapporte quelle était alors la situation : «Au sujet du pôle Nord, Eudoxe fait erreur lorsqu'il dit : "Il y a un astre qui demeure toujours au même endroit, cet astre est le pôle du monde." Et c'est qu'en effet au pôle il n'y a aucun astre, mais un endroit vide, près duquel se trouvent trois étoiles, avec lesquelles le signe qu'on mettrait au pôle constitue à peu près un quadrilatère, comme le dit aussi Pythéas le Massaliote.» Hipparque témoigne là en faveur de Pythéas qui fait montre de plus d'attention et d'exactitude qu'Eudoxe.

Les astronomes du XIX^e siècle et les calculs de la mécanique céleste ont permis depuis de préciser les trois étoiles identifiées par Pythéas. Il s'agit des étoiles alpha et kappa de la constellation du Dragon et de l'étoile bêta de la Petite Ourse.

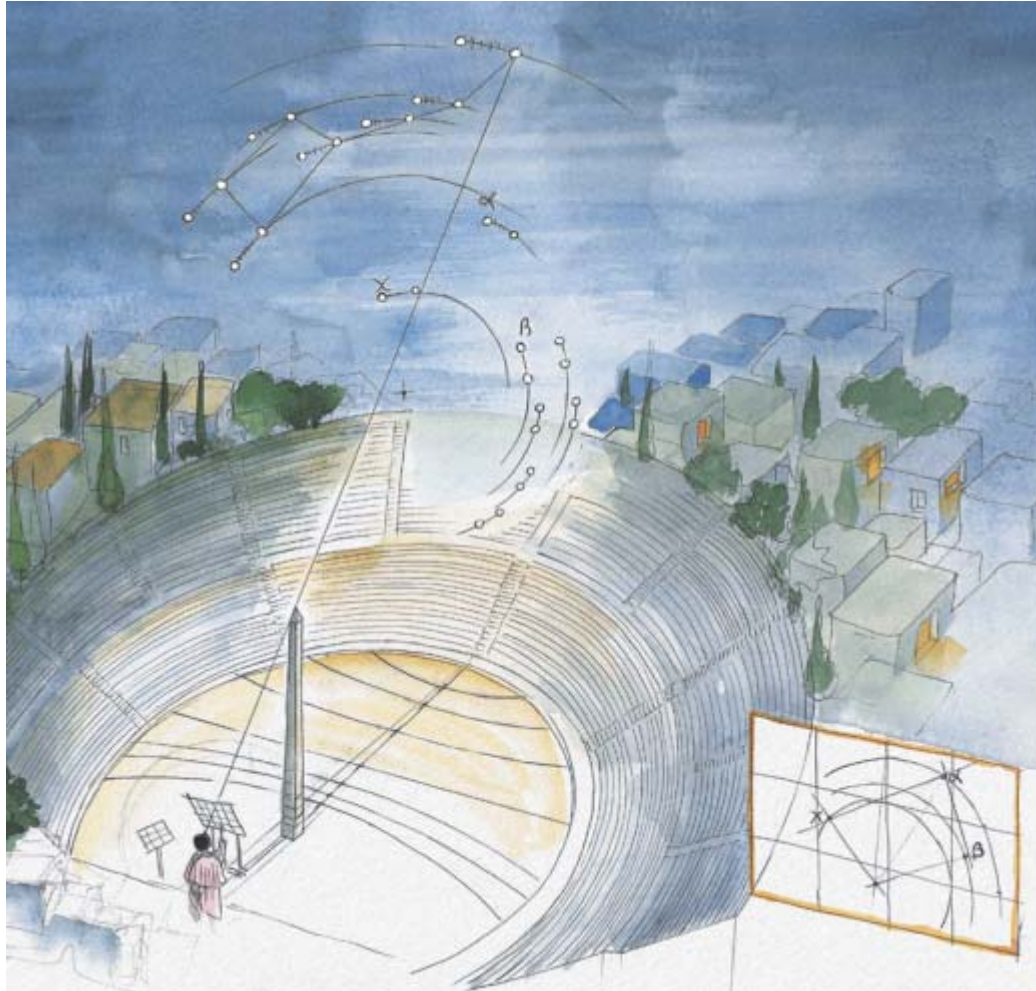
Observateur du ciel, Pythéas fut aussi curieux de la vie des peuples. Diodore de Sicile (I^{er} siècle avant notre ère) décrit le mode de vie des indigènes qui habitent alors les Îles britanniques, sans doute d'après un texte de Pythéas : «On dit que c'est une race autochtone qui habite la grande île britannique et que ses mœurs sont celles d'autrefois. D'une part, en effet, dans leurs guerres, ils se servent de chars comme nous avons appris par la tradition que le faisaient les héros grecs dans la guerre de Troie, et, d'autre part, ils ont des habitations fort pauvres faites le plus souvent de roseaux et de bois. Ils font leur provision de blé en coupant les épis et en les conservant dans des abris couverts. De ces réserves, ils tirent chaque jour les vieux épis

qu'ils égrènent et travaillent de façon à y trouver nourriture. Pour ce qui est de leur caractère, ce sont des gens très simples et bien éloignés de cet esprit vif et méchant qui est celui des gens d'aujourd'hui. Leur façon de vivre est rudimentaire et n'a rien à voir avec cette vie molle et voluptueuse qui naît de la richesse. On dit aussi que l'île est peuplée et que l'air y est tout à fait froid, comme il est naturel pour un pays qui se trouve sous l'Ourse même. Ils ont de nombreux rois et chefs et généralement vivent en paix les uns avec les autres.»

La mesure du méridien

Une fois encore, Strabon a sauvé, de l'œuvre perdue d'Hipparque, un passage sur les latitudes mesurées par Pythéas en Celtique et en (Grande) Bretagne. Hipparque, se fiant à Pythéas, rapporte qu'«à 6 300 stades de Marseille pendant les journées d'hiver, le Soleil ne s'élève qu'à 6 coudées et à 4 coudées seulement à 9 100 stades de Marseille, à moins de 3 coudées dans les régions au-delà...» La lecture du texte complet nous permet d'identifier ces trois points de latitude et, sachant qu'un angle de une coudée vaut deux degrés, on constate la précision des mesures effectuées par Pythéas : le premier point, en Celtique, est à 6 300 stades. Le Soleil en hiver est à 12° au-dessus de l'horizon au lieu de 23° à Marseille. Pythéas a donc parcouru 11° vers le Nord depuis Marseille (situé à la latitude 43°) : il se trouve à 54° de latitude.

C'est bien la presqu'île de Jütland, limite de la Celtique. Le deuxième point, au septentrion de la (Grande) Bretagne, est à 9 100 stades. Le Soleil est à 8° seulement au-dessus de l'horizon, ce qui correspond à la latitude de 58°. C'est, à demi-degré près, le cap Orcas, au Nord de la Grande-Bretagne. Le troisième point, le Soleil à moins de 3 coudées, correspond à la latitude de 60°. Ce sont les îles Shetland, situées entre 59,8° et 60,8°. Pour Thulé, la massive Islande qui s'étend entre les parallèles 63,4° et 66,5°, la distance et la latitude sont également justes. L'astronome marseillais nous rapporte aussi des durées de nuits au solstice d'été, d'où l'on déduit d'autres latitudes de ces contrées nordiques. Toutes ces mesures de latitude serviront de base, pour l'Europe du Nord, à la carte du monde qu'établira Ératosthène.



6. POUR DESSINER LA CARTE DU PÔLE CÉLESTE, Pythéas dresse une lucarne, une grille, au Sud du gnomon. Il profite de la lueur d'une nuit de pleine lune et d'une longue nuit d'hiver. Heure après heure, il vient repérer les arcs de cercles décrits par les étoiles les plus proches du pôle céleste et affirme : «Au pôle, il n'y a aucun astre, mais un endroit vide, près duquel se trouvent trois étoiles, avec lesquelles le signe qu'on mettrait au pôle constitue à peu près un quadrilatère.» C'était les étoiles alpha et kappa de la constellation du Dragon et bêta de la Petite Ourse.

Strabon précise : «Pythéas dit que Thulé est à une distance de six jours de navigation de la (Grande) Bretagne en direction du Nord et qu'elle est proche de la mer gelée.» Pline confirme, qu'à [...] «six jours de navigation [...] la plus reculée de toutes les îles est Thulé», c'est le pays des confins, l'*Ultima Thule*, selon la formule de Virgile.

Là, à ce point du voyage se situe le célèbre épisode du «poumon marin». Pythéas utilise cette expression bien connue des Grecs (qui signifie méduse) pour décrire à ses concitoyens le phénomène étrange dont il fut le témoin. Résumant Pythéas, Pline écrit : «À un seul jour de navigation de Thulé se trouve la

mer figée», et Strabon précise : «Pythéas parle en outre des parages de Thulé et de ces lieux, dans lesquels il n'existe plus de terre proprement dite, ni de mer ni d'air, mais un mélange fait de ces choses, semblable au poumon marin, dans lequel il dit que la terre et la mer et toutes choses sont comme en suspension, comme si ce quelque chose était un lien entre tous les éléments, ne permettant ni de marcher ni de naviguer.»

Le voyageur a atteint la banquise. L'exploration s'achève aux confins du monde habité. Pythéas est contraint de faire demi-tour, auteur d'une expédition dont on mesurera, longtemps après, la dimension historique et scientifique.

Yvon GEORGELIN est astrophysicien à l'Observatoire de Marseille. François HERBAUX est journaliste.

Jean-Baptiste DELAMBRE, *Histoire de l'Astronomie Ancienne*, Mathieu, Paris, 1817.

Paul-Émile VICTOR, *L'homme à la conquête des pôles*, Plon, 1962.

Christina ROSEMAN, *Pytheas of Massalia, On the Ocean*, Are publishers, Chicago, Illinois, 1994.

Pythéas, explorateur et astronome, texte de Hugues JOURNÈS et Yvon GEORGELIN, aquarelles de Jean-Marie GASSEND, Éditions de la Nerthe, Ollioules (Var), 2000.

La reconnaissance des et ses anomalies

PATRICK VERSTICHEL

Comment reconnaît-on des centaines de visages à la fois similaires et différents ? Dans le cerveau droit, des réseaux de neurones spécialisés assurent plutôt l'analyse visuelle et d'autres, dans le cerveau gauche, l'analyse sémantique, c'est-à-dire la restitution des données biographiques et des noms.

Brusquement, on est entouré d'inconnus dans sa propre maison, on voit se refléter un étranger dans son miroir... Non, il ne s'agit pas d'un film de fiction, où des « envahisseurs » auraient pris le contrôle de la planète, mais de la sensation qu'éprouvent certaines personnes victimes de lésions cérébrales. Mentionné pour la première fois en 1867 par deux ophtalmologistes italiens, Antonio Quaglino et Giambattista Borelli, ce trouble a été, en 1947, qualifié par le neuropsychiatre J. Bodamer de prosopagnosie (du grec *prosôpon* qui signifie visage et *agnôsia*, ignorance). Les personnes atteintes ne peuvent plus identifier leurs proches par leur face. Tous les visages connus de longue date paraissent tout à coup des visages d'étrangers.

Dans le pire des cas, leur propre visage subit le même sort : « Au club, j'ai vu quelqu'un d'étrange qui me regardait et j'ai demandé au maître d'hôtel qui c'était. Vous allez rire... je me regardais dans un miroir. » Ils identifient leur entourage par la voix, les vêtements, la coupe de cheveux ou toute autre particularité. Dans certains cas, ce trouble de reconnaissance ne concerne que les visages : les objets et les lieux familiers sont parfaitement identifiés. Plus surprenant encore, certains patients gardent le souvenir intact des visages connus avant leur trouble et peuvent même dessiner de mémoire un visage, tout en étant incapables de reconnaître la personne concernée quand ils la croisent.

Pourtant, la faculté de reconnaître les autres par leur physionomie, d'un

simple coup d'œil, semble si aisée, si automatique ! Quasi instantanée, une telle opération relève de mécanismes complexes qui font intervenir de vastes zones cérébrales. L'importance que chacun accorde au visage d'autrui (et au sien propre !) est une preuve de la complexité des mécanismes en jeu.

On commence à comprendre les différentes étapes de la reconnaissance des visages et l'origine des troubles de cette reconnaissance. Selon un modèle récemment proposé, les visages sont gravés dans des réseaux de neurones spécialisés et interconnectés ; l'analyse visuelle et la confrontation avec les visages mémorisés sont essentiellement l'œuvre du cerveau droit, la mémorisation des informations biographiques et le rappel de ces informations, celle du cerveau gauche

Qu'est-ce qu'un visage ?

Un visage est une structure tridimensionnelle possédant une configuration « externe » – le contour de la face modelé par les saillies osseuses et souligné par les cheveux – où s'inscrit une configuration « interne » formée par l'assemblage des traits : les yeux, les sourcils, le nez et la bouche. Certaines particularités s'y ajoutent, telles que la pilosité, des lunettes, la texture et la coloration de la peau, les accidents cutanés (une verrue, un grain de beauté, etc.). Sauf exception, tous les visages ont une architecture générale voisine et ne diffèrent que par de subtiles modifications de la configuration externe ainsi que de

la forme des éléments internes et de leurs rapports.

Malgré les faibles différences existant entre chaque visage, on reconnaît et on identifie des centaines (voire des milliers) de visages. Cette performance est d'autant plus extraordinaire qu'un visage donné ne se présente jamais identique à lui-même : l'angle sous lequel il est perçu varie (il est de face, de profil ou de trois quarts) ; selon l'éclairage les motifs faciaux changent ; les expressions font bouger les traits, qui évoluent avec l'âge. Pourtant, on reconnaît un visage quelles que soient ces conditions : notre cerveau sait en dégager un « invariant physionomique » sous-jacent, qu'il conserve en mémoire.

Chaque membre d'une espèce sociale doit distinguer ses congénères les uns des autres : c'est une condition nécessaire à toute relation interindividuelle. Dans l'espèce humaine, comme dans d'autres espèces animales, le visage est l'élément qui convoie le plus d'informations et assure une telle distinction. Par là même un visage n'est jamais neutre. Nous pouvons le classer selon qu'il est connu ou inconnu, le définir en termes affectifs (il est sympathique ou antipathique, attrayant ou repoussant, amical ou menaçant) ou lui attribuer divers qualificatifs (c'est un visage aristocratique ou plébéien, intelligent ou stupide...). Nous pouvons enfin lui attribuer une dimension particulière : la beauté. Les connaissances récemment acquises sur les traitements cérébraux des visages ont montré que ces divers aspects dépendent de systèmes neurologiques différents.