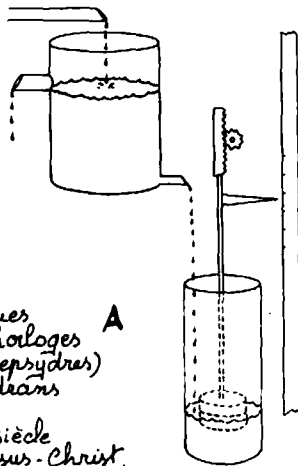
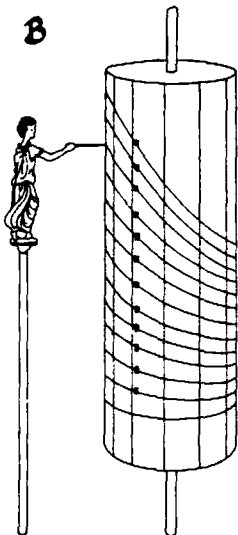


1) Pour mesurer les durées de longueur moyenne, les Grecs ne disposaient pas d'horloges mécaniques mais d'horloges à eau (clepsydres) et de cadran solaire.



Au III^e siècle avant Jésus-Christ, Ctésibios d'Alexandrie perfectionna les clepsydres en leur ajoutant une cuve à niveau constant (schéma A) d'eau qui s'écoulait de cette cuve avec un débit régulier ; en tombant dans une autre cuve où se trouvait un flotteur, elle faisait monter celui-ci de façon également régulière. Un index permettait de lire la quantité de temps écoulée. Ctésibios inventa aussi des procédés permettant de modifier la longueur des heures en fonction des saisons. Dans l'Antiquité gréco-romaine, en effet, la journée était divisée en douze heures, de même que la nuit. Les heures,

B



pour que l'index permette une lecture directe du nombre d'heures écoulées.

(D'après C. Singer et al. (eds.), *A history of technology*, vol. III, Oxford, 1957)

La science grecque et le problème de la mesure

par Geoffrey E.R. Lloyd

Lors de la « révolution scientifique », au XVI^e et au XVII^e siècles, les astronomes et les physiciens ont pratiqué couramment la mesure et ont utilisé délibérément le langage mathématique.

Mais qu'en était-il dans l'Antiquité ?

Les Grecs, en particulier, ont-ils été capables d'élaborer une science quantitative ? La réponse de certains historiens est plutôt négative. Certes,

les Grecs ont eu l'idée de mathématiser la nature ;

parfois même, en astronomie par exemple,

ils ont victorieusement recouru au quantitatif. Mais le bilan, selon ces historiens, demeure modeste.

G.E.R. Lloyd, qui étudie depuis longtemps la science ancienne, réexamine ce problème et formule

des conclusions beaucoup plus nuancées. Loin d'avoir ignoré les mesures, les Grecs ont souvent été tentés d'en faire un usage abusif...

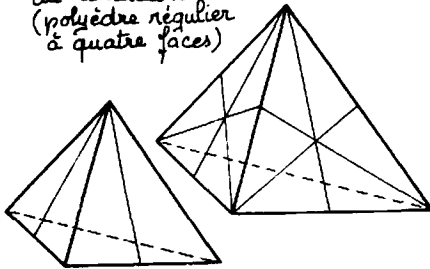
L'un des grands reproches qu'on a fait à la science des anciens Grecs, c'est d'avoir été essentiellement qualitative. Tant dans les sciences physiques que dans les sciences de la vie, a-t-on dit, les théories des Grecs ne revêtaient pas une forme strictement quantitative (comme c'est le cas dans la physique et dans la chimie) ; et elles n'étaient pas davantage étayées par des données quantitatives précises. L'un des principaux défenseurs de cette thèse était l'historien des sciences Alexandre Koyré. Dans son étude intitulée *Du monde de l'« à-peu-près » à l'univers de la précision*, il affirmait que les Grecs n'avaient aucune véritable technologie ni aucune véritable physique au sens où nous l'entendons.⁽¹⁾ Ils n'ont jamais cherché, poursuivait-il, à mathématiser la physique de la Terre. La science antique, selon Koyré, « n'a jamais essayé (...) d'employer sur la terre

un instrument de mesure et même de mesurer quoi que ce soit en dehors des distances ». Parlant de la science avant Galilée, il écrivait : « Personne ne s'est avisé de compter, de peser, de mesurer. Ou, plus exactement, personne n'a jamais cherché à dépasser l'usage pratique du nombre, du poids, de la mesure dans l'imprécision de la vie quotidienne. »

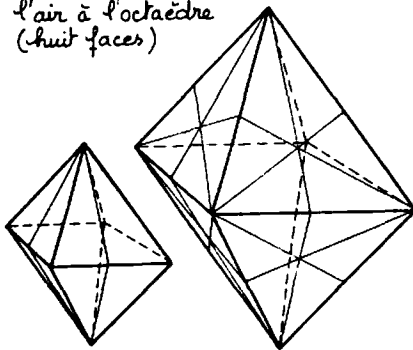
L'article de Koyré a eu le grand mérite d'attirer l'attention sur un problème fondamental et la thèse qu'il avance est claire et nette. Il lui a tout de même apporté quelques nuances, en particulier pour tenir compte des réussites des Grecs dans le domaine de la physique céleste ; et, en ce qui concerne la physique sublunaire, il a accordé une mention honorable au « divin Archimède ». L'accent, cependant, était mis sur les limites des réalisations de ce dernier : il avait une statique, mais pas de dynamique. Comme le montrent ces

2) Dans la théorie platonicienne des éléments (qui est une variante de l'atomisme), chacun des quatre éléments est identifié à l'un des solides réguliers :

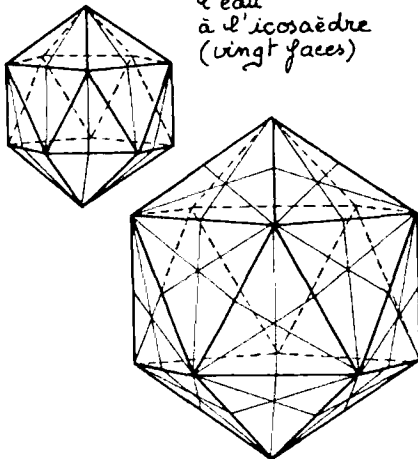
le feu au tétraèdre (polyèdre régulier à quatre faces)



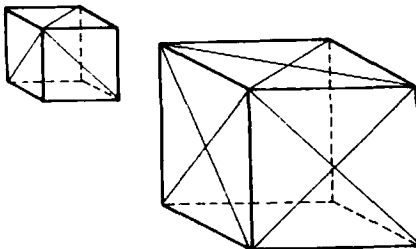
l'air à l'octaèdre (huit faces)



l'eau à l'icosaèdre (vingt faces)



et la terre au cube (six faces)



exceptions. Koyré s'est bien rendu compte que le problème est plus complexe que certaines de ses généralisations ne le suggèrent. Dans la brève analyse qui suit, je tenterai d'abord de voir dans quelle mesure Koyré a raison lorsqu'il parle de l'incapacité fondamentale des Grecs à utiliser la mesure. Puis j'illustrerai quelques-uns des aspects tant positifs que négatifs de la recherche de l'exactitude chez les Anciens. Je formulerai quelques remarques, enfin, sur quelques-uns des pré-supposés épistémologiques qui sous-tendaient leur attitude.

Aristote a-t-il formulé des « lois » du mouvement ?

Commençons par deux domaines qui semblent fortement corroborer la thèse de Koyré : la dynamique (qui constitue son exemple principal) et la théorie des éléments. Dans ce que nous appelons la dynamique, c'est-à-dire l'étude des corps en mouvement, il est notoire que, jusqu'à Aristote, les Grecs ne sont pas allés au-delà de l'expression de quelques vagues principes tels que « les semblables s'attirent ». Les atomistes du V^e siècle, par exemple, ont appliqué ce principe aussi bien aux objets inanimés qu'aux êtres animés, aussi bien aux oiseaux qu'aux galets. Il est bien connu qu'Aristote lui-même n'a pas donné une *théorie* des facteurs qui influencent la vitesse des corps en mouvement (que ce mouvement soit « naturel », comme dans la chute libre, ou « violent », comme dans le cas d'un jet de pierre). Il s'est contenté de glisser quelques affirmations souvent très vagues sur ce sujet dans les exposés consacrés à d'autres problèmes. Parfois, cependant, il a suggéré l'existence de proportions remarquables. Ainsi, à propos du mouvement naturel, il a écrit ceci : « Si un certain poids se déplace sur une certaine distance en un certain temps, un plus grand poids mettra moins de temps à parcourir la même distance, et le temps écoulé sera inversement proportionnel au poids ; par exemple, si un poids couvre la distance en un temps donné, un poids double la couvrira en la moitié de ce temps. » De même, au sujet du mouvement « forcé » : « Si A, qui cause le mouvement, déplace B sur une distance C en un temps D, alors dans le même temps, la même force A déplacera la moitié de B sur deux fois la distance C. »

D'où ce problème d'interprétation : Aristote a-t-il voulu formuler des lois précises relatives au mouvement ? A-t-il vraiment voulu établir une *relation mathématique* du type $V \propto P$ (la vitesse varie proportionnellement au poids) ? Ce qu'il dit des proportions a souvent été compris ainsi, dans l'Antiquité comme à l'époque moderne. Mais, ainsi que l'ont montré plusieurs chercheurs modernes, c'est là de toute évidence une interprétation abusive. Le but principal d'Aristote, dans le premier passage cité, n'est pas d'étudier les facteurs régissant la vitesse des corps

en mouvement naturel, mais plutôt de réfuter l'idée qu'il puisse exister un corps infini de poids infini. Pour cela, il lui suffit de faire remarquer qu'il existe une proportion, une relation *finie* entre les temps ou les vitesses d'une part et les poids d'autre part. Non seulement il n'énonce aucune formule du type $V \propto P$, mais il ne s'interroge même pas sur les conditions dans lesquelles se produit l'accroissement de vitesse dont il parle. Il tient pour acquis que l'accroissement du poids entraîne un certain accroissement de la vitesse et ne cherche pas à préciser cette notion, encore moins à la mesurer.

En second lieu, la suite du passage relatif au mouvement « violent » montre qu'Aristote est conscient des limites d'applicabilité du principe qu'il esquisse. Rien ne prouve que la moitié de la force considérée soit capable de déplacer le même objet, si peu que ce soit. Autrement, dit-il, « un seul homme pourrait déplacer un navire, puisque la force des haleurs comme la distance sur laquelle ils font avancer le bateau sont divisibles par le nombre d'hommes ». Ceci indique clairement que les proportionnalités ne sont pas, en l'occurrence, destinées à s'appliquer *strictement* en tant que règles *universelles*. Les choses sont encore plus nettes si l'on considère l'éventail des phénomènes qu'Aristote accepte comme illustrations de ces proportionnalités. Car il y inclut le développement et la croissance, la poussée, l'élévation de température, ainsi que tout changement de qualité ou tout mouvement quels qu'ils soient. Et comme Aristote se fait une conception essentiellement qualitative du chaud et du froid, il est évident qu'il n'est pas question pour lui en pareil cas de traduire les proportions en termes de quantités exactes.

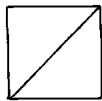
Quelle qu'ait pu être son importance, Aristote ne fut pas le seul théoricien de l'Antiquité à se pencher sur le problème du mouvement. Plusieurs auteurs postérieurs devaient mettre en cause ses idées, certains s'efforçant d'élargir la base empirique du débat. Ainsi, au III^e siècle av. J.-C., Straton de Lampsaque s'est appuyé sur des faits pour confirmer le phénomène de l'accélération (comme nous l'appelons) dans les mouvements naturels ; mais ses observations, à en juger par les comptes rendus, étaient tout à fait imprécises : « Si l'on observe de l'eau qui se déverse d'un toit et qui tombe d'une hauteur considérable, on voit tout en haut un écoulement continu, tandis qu'en bas l'eau parvient au sol par portions discontinues. Cela ne peut se produire que si cette eau traverse de plus en plus rapidement les espaces successifs (...). Lorsqu'on laisse tomber une pierre d'une hauteur d'environ une largeur de doigt, l'impact au sol n'est pas perceptible, mais si on lâche l'objet d'une hauteur d'une centaine de pieds ou davantage, alors l'impact est extrêmement puissant. »

Beaucoup plus tard, au VI^e siècle de notre ère, Philopon, le plus virulent cri-

Geoffrey E.R. Lloyd est professeur de philosophie et de science anciennes à l'université de Cambridge (King's College). Il est l'auteur de plusieurs ouvrages importants sur la science grecque. Il a obtenu en 1987 la médaille Sarton, une haute récompense décernée par la History of science society (Etats-Unis).

2) suite

Pour construire ces figures, Platon utilise deux types de triangle de base :



le triangle rectangle
isocèle
(pour le cube)

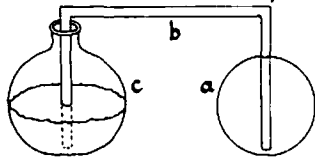


le demi-triangle
équilateral
(pour les trois autres)

Il n'a pu lui échapper que l'un des côtés a pour valeur $\sqrt{3}$ dans un cas et $\sqrt{3}$ dans l'autre (c'est à dire des valeurs "irrationnelles"). Alors que dans la théorie de Démocrite la forme des atomes varie à l'infini, chez Platon, en revanche, les atomes ont des formes bien déterminées; mais ils possèdent une caractéristique qui suggère que la structure fondamentale des objets matériels a quelque chose d'irrationalnel.

(D'après G.E.R. Lloyd, *Early Greek Science*, Thales à Aristote, Londres, 1969; P. Friedländer, *Plato. An introduction*, trad. H. Meyerhoff, vol. I, Londres, 1958)

3) Philon de Byzance (vers 200 avant J.C.) et Héron d'Alexandrie (1^{er} siècle de notre ère) décrivent tous deux des systèmes pneumatiques auxquels on a donné le nom de « thermoscopes ».



Chez Philon, une sphère (a) remplie d'air et fermée hermétiquement est reliée par un tube courbe (b) à un récipient contenant de l'eau (c). Lorsque la sphère est chauffée « grâce à une exposition au soleil » (mais on obtient le même résultat, note Philon, en chauffant la sphère par d'autres moyens), l'air se dégage dans le récipient (c) en formant des bulles; et lorsque la sphère se refroidit, l'eau remonte dans le tube vers la sphère. A partir d'un tel appareil, il aurait été possible de procéder à des mesures plus ou moins précises de température. Mais ni Philon ni Héron ne faisaient transparence qu'ils ont eu l'idée d'une telle application. Leurs dispositifs (comme tant d'autres décrits dans leurs œuvres) ne servent qu'à illustrer un phénomène surprenant.

(D'après W. Schmidt, *Heronis Alexandrini opera*, vol. I, Leipzig, 1899)

tique d'Aristote en matière de dynamique, allait tenter de réfuter les conceptions de ce dernier en faisant appel à des considérations à la fois logiques et empiriques. Il discerne chez Aristote cette idée : pour tout mouvement naturel à travers un même milieu, la durée est inversement proportionnelle au poids du corps qui se déplace. Ce qu'il commente en ces termes : « Ceci est entièrement faux et l'observation le montre mieux que n'importe quelle démonstration abstraite. » Il envisage alors un test qui réfuterait la théorie d'Aristote. Mais la description qu'il en donne est d'une imprécision remarquable : « Car si vous laissez tomber en même temps et d'une même hauteur deux poids très différents l'un de l'autre, vous ne constaterez pas que la proportion entre les durées des deux mouvements correspond à la proportion entre les poids, mais que la différence des durées est minime. » Même dans ces textes, qui nous rapportent la discussion la plus serrée des problèmes de dynamique qui ait eu lieu dans l'Antiquité, Philon se contente de montrer de manière tout à fait générale que les proportions supposées par Aristote sont loin du compte : il ne rapporte lui-même aucune mesure exacte obtenue lors d'expériences effectives, si tant est qu'il en ait réellement effectuées.

Il ne faut pas voir là seulement un blocage conceptuel. Il entre également en jeu un facteur technique : la difficulté qu'il y a à mesurer avec précision de courtes durées. Il ne faut pas, toutefois, exagérer l'importance de cet obstacle ; car, après tout, certaines des expériences rapportées par Galilée lui-même dans ses *Discours sur deux sciences nouvelles* font appel à des techniques de mesure du temps guère supérieures aux meilleurs procédés en usage dans l'Antiquité (voir « Galilée et l'expérimentation » dans notre numéro d'avril 1983).

Le second domaine qui semble bien corroborer la thèse de Koyré est la théorie des éléments. La tradition dominante dans l'Antiquité, en ce domaine, est représentée par les doctrines qui considèrent la terre, l'eau, l'air et le feu (ou encore le chaud, le froid, le sec, l'humide, etc.), séparément ou combinés, comme les éléments fondamentaux. Certes, l'atomisme, dans chacune de ses variantes grecques anciennes, présente un aspect quantitatif. Les particules indivisibles fondamentales se distinguent par la forme, par la taille, par la disposition et — parfois — par le poids. Mais, bien que partiellement mathématiques, les théories atomistes de l'Antiquité restent toutes très approximatives, très « impressionnistes » dans leurs applications. On ne peut pas dire qu'il n'y ait pas de « règles de correspondance » (l'épistémologue Hempel désigne ainsi les énoncés qui permettent de relier les énoncés observationnels aux hypothèses initiales); mais ces règles sont formulées de façon complètement vague. On ne trouve pra-

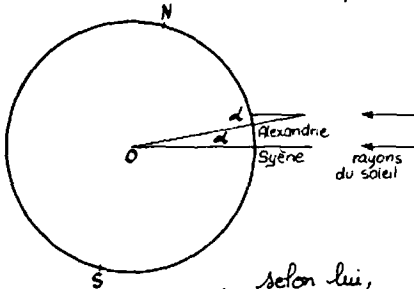
tiquement pas de mesures précises dans les relevés d'observations servant d'illustration aux théories ; elles font plutôt appel à de vagues analogies physiques. A ce propos, il est frappant de constater qu'Aristote, lorsqu'il critique les atomistes pour leur incapacité à expliquer les modifications et interactions des corps, s'élève entre autres contre leurs tentatives pour réduire les différences qualitatives à des différences quantitatives. Et pourtant, aucune théorie atomiste ancienne n'a réussi à dériver celles-là de celles-ci.

Dans les théories dominantes sur les éléments, qui étaient essentiellement qualitatives (telle celle d'Aristote), l'occasion était rarement saisie de procéder à des mesures directes. A l'instar du sec et de l'humide, le chaud et le froid eux-mêmes apparaissaient comme des qualités non mesurables. Aristote conçoit les phénomènes à expliquer et ses propres explications dans un style résolument qualitatif. Les problèmes qu'il soulève concernent des propriétés de ce genre : est-ce qu'une substance peut ou non être solidifiée, fondue ou brisée ? Et il se satisfait d'une explication classant les composés en fonction des corps simples qui prédominent en eux. Son principal ouvrage consacré à ce travail, les *Météorologiques* (livre IV), évoque souvent non seulement différents types de composés, mais également des phénomènes tels que l'évaporation ou la combustion. Le livre, pourtant, ne contient pas une seule mesure précise. Or la pesée et la mesure des composés et de leurs composants ne se heurtaient pas au genre d'obstacle technique qui existait à propos de la mesure du temps. Si les théories qualitatives l'emportaient sur les théories quantitatives, c'était tout simplement parce que les phénomènes à expliquer étaient eux-mêmes conçus en termes qualitatifs. Dès lors, toute réduction au quantitatif prêtait le flanc à la critique : il ne fallait pas se tromper de « catégorie » !

La mesure de la circonférence de la Terre.

Mais, à côté des domaines que j'ai examinés jusqu'ici et qui corroborent plutôt le jugement de Koyré, il en est d'autres qui montrent que ce dernier doit être sérieusement nuancé. Considérons tout d'abord un exemple tiré de la géophysique. Dès l'époque d'Aristote, on tenta de déterminer la taille de la Terre. Sa circonférence, comme le rapporte Aristote lui-même, fut évaluée à quatre cent mille stades. Nous ne savons pas quelle fut la méthode employée, ni laquelle parmi les diverses valeurs possibles du stade fut utilisée pour ce calcul. Selon les conventions, cette unité de longueur pouvait avoir diverses valeurs, par exemple 148,8 mètres ou 180 mètres ; c'est une difficulté qu'on rencontre souvent en étudiant les Anciens. Par la suite, on recourut à diverses techniques : ou bien on utilisa la méthode d'Eratosthène décrite dans l'illustration 4 ; ou bien

4) Erastothène de Cyrène (III^e siècle avant J.-C.) fut l'un des premiers hommes de science qui essayèrent de calculer la circonférence de la Terre; et c'est le premier dont, grâce à des documents historiques, nous connaissons avec exactitude la méthode. Pour effectuer ses calculs, il se fonda sur des mesures effectuées en observant l'ombre projetée par un gnomon, c'est-à-dire par une fine aiguille verticale. Plus précisément, il utilisa deux mesures angulaires réalisées à midi, lors du solstice d'été, en deux points de la Terre qui,



se trouvaient sur le même méridien : Alexandrie et Syène (aujourd'hui Assouan). À Syène, il fut constaté qu'aucune ombre n'était projetée; le gnomon, autrement dit, se situait exactement dans l'axe des rayons solaires. (A. Alexandrie (voir schéma ci-dessus), l'angle α était égal à un cinquantième de circonférence, c'est-à-dire à $7,2$ degrés. Admettant que la distance entre les deux lieux valait cinq mille stades, Erastothène, grâce à un raisonnement géométrique simple, obtint le chiffre de deux cent cinquante mille stades pour la circonférence terrestre. Bien que cette méthode fut correcte dans son principe, son application pouvait conduire (et a conduit) à des résultats inexacts. Car il y a plusieurs sources d'erreurs. En premier lieu, le calcul n'est juste que si les deux points de référence sont bien situés sur le même méridien. En second lieu, il faut être sûr qu'on a mesuré de façon suffisamment précise l'angle fait par le gnomon et les rayons lumineux. En troisième lieu, il faut pouvoir calculer correctement la distance entre les deux villes concernées. À quoi il faut ajouter que, dans l'Antiquité, il y avait au moins sept façons de définir l'unité de longueur qu'était le stade. Des discussions ont donc lieu entre historiens pour savoir quelle était la longueur absolue du stade d'Erastothène. A-t-il utilisé un stade valant un huitième de mille romain (environ 186 mètres)? Ou bien un autre stade valant un dixième de mille (environ 149,8 mètres)? Dans le premier cas, le résultat d'Erastothène est de 16 % trop haut, dans le second cas de 7 % trop bas par rapport à la mesure actuellement ad-

la méthode de Poséidonios, qui consistait à comparer certaines observations relatives à l'élévation d'une étoile remarquable au-dessus de l'horizon. La précision des résultats obtenus est diversement appréciée par les historiens. Mais cela ne change rien au fait que, à cette époque, on a alors cherché à évaluer la taille de la Terre en termes quantitatifs précis, par des calculs effectués à partir d'observations et de mesures.

L'astronomie fournit un bien plus large éventail d'exemples. De nombreuses observations détaillées étaient faites soit à des fins essentiellement descriptives (élaboration d'un catalogue d'étoiles, par exemple), soit pour établir les paramètres de certains modèles astronomiques; et nos principales sources révèlent un souci constant quant à la précision des instruments utilisés pour ces observations. Etant donné que Koyré lui-même a déclaré que la physique céleste des Anciens était l'exception qui confirme la règle, nous n'énumérerons pas ici en détail les observations astronomiques effectuées par les Grecs. Mieux vaut se demander si les raisons qui expliquent les succès de l'astronomie quantitative chez les Grecs sont bien celles invoquées par Koyré. Selon lui, en effet, la différence entre physique céleste et physique terrestre avait pour fondement la doctrine métaphysique selon laquelle le monde supralunaire et le monde sublunaire constituaient deux domaines tout à fait distincts. Le monde supralunaire, parce qu'il était considéré comme parfait, apparaissait comme incarnant un ordre immuable.

En astronomie, il est important de s'interroger sur la fiabilité des instruments et de se rendre compte que l'exactitude des données varie suivant le contexte. Cela fait comprendre que la précision des mesures n'a rien d'automatique et que l'objectif a toujours été de parvenir au maximum de précision possible compte tenu des circonstances. Dans l'Antiquité, rigueur et exactitude ont fait l'orgueil de cette science. Mais ce n'était pas essentiellement parce que l'astronomie s'intéressait aux phénomènes célestes en les considérant comme immuables; plus simplement, c'était parce qu'elle reposait sur les mathématiques.

Les succès de la quantification : théorie musicale et optique.

Deux autres domaines d'investigation, qui ne concernent ni l'un ni l'autre les phénomènes supralunaires et qui étaient tous deux perçus habituellement comme mathématiques, nous permettront de tester cette thèse. Dans la science de l'harmonie, qui étudiait les rapports entre les sons (en particulier dans le cas des cordes vibrantes), il y avait un débat ancien sur la nature des phénomènes musicaux étudiés; certains adoptaient un point de vue radicalement empirique, d'autres au contraire allaient jusqu'à réduire l'har-

monie à une pure théorie des nombres. Des mesures, en tout cas, ont été effectuées dès une époque très reculée. Platon, déjà, critiquait pour leur « labeur inutile » les chercheurs qui tentaient de mesurer les rapports qu'entretenaient les sons audibles les uns avec les autres. Mais, comme nous l'apprenons par toute une lignée d'auteurs postérieurs ayant écrit sur l'harmonie, d'Aristoxène à Ptolémée et Porphyre, nombreux ont été les chercheurs qui, malgré les critiques de Platon, ont fondé leur théorie musicale sur des données empiriques, par exemple grâce à des observations sur le monochorde. Cette étude des « harmoniques » constitue sans aucun doute l'un des premiers et des plus remarquables exemples d'une explication quantitative réussie de certains phénomènes qualitatifs.

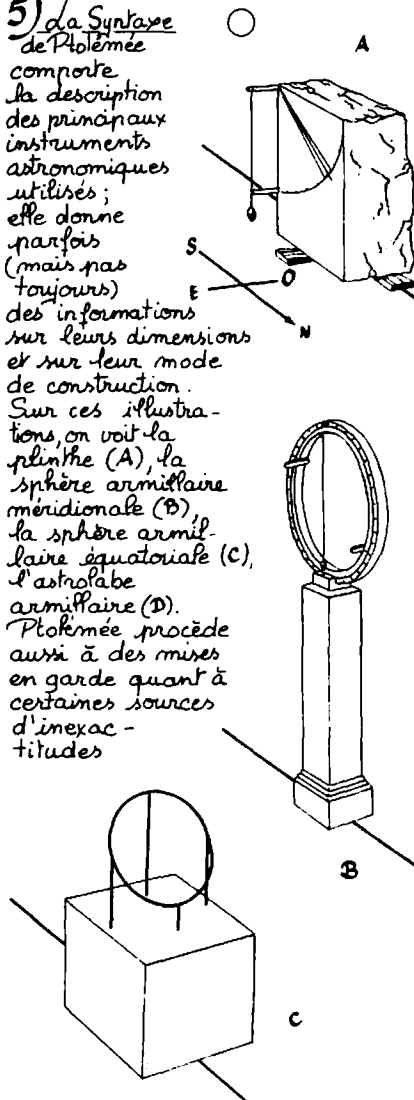
L'optique, elle aussi, illustre le développement parallèle, dans l'Antiquité, des études purement géométriques et des recherches empiriques. En ce qui concerne ces dernières, l'ouvrage le plus marquant est l'*Optique* de Ptolémée, tant à cause de ses tests empiriques destinés à corroborer les lois de la réflexion qu'à cause de ses recherches minutieuses sur la réfraction. Le livre V indique les valeurs de la réfraction par intervalles de 10° pour tous les angles d'incidence compris entre 10° et 80° , d'abord pour le passage de l'air dans l'eau, puis pour le passage de l'air dans le verre et enfin pour le passage de l'eau dans le verre. Il est vrai qu'on a là l'un des plus beaux exemples de « tripatouillage » de toute l'Antiquité, car Ptolémée a de toute évidence « ajusté » ses résultats pour mieux les faire cadrer avec la loi générale. Mais il n'en demeure pas moins que cette loi complexe n'a pu être mise en évidence que grâce à un certain nombre de recherches empiriques impliquant la mesure d'angles d'incidence et de réfraction; et ce, même si ces recherches n'ont pas toujours donné effectivement les résultats rapportés par Ptolémée.

Il y avait une technique simple de mesure, la pesée, qui était utilisée dans un grand nombre d'activités; et celle-ci ne nous écartera guère de notre sujet. Si le lourd et le léger sont souvent cités dans l'Antiquité comme étant des propriétés des substances naturelles, ils étaient souvent perçus en termes purement qualitatifs, au même titre que l'humide ou le sec, le salé ou l'amer. Parfois, cependant, il est clairement fait état d'une pesée; c'est le cas, naturellement, avec le fameux principe hydrostatique d'Archimède. Chez les auteurs médicaux, la pesée et la mesure sont au cœur d'un autre débat: dans quelle mesure la médecine peut-elle être considérée comme une science exacte? Certains théoriciens prétendaient que c'était le cas. Mais d'autres se sont élevés contre l'idée même de pratiquer la médecine comme une science exacte, allant parfois jusqu'à refuser une procédure comme la pesée. Le traité hippocratique sur *L'ancienne médecine* déclare par

4) suite
mise : 40009 kilomètres. Rappelons qu'Aristote acceptait une évaluation de quatre mille stades pour la circonférence de la terre.

0 (D'après G. E. R. Lloyd, *Greek science after Aristotle*, Londres, 1943)

5) La Syntaxe de Ptolémée comporte la description des principaux instruments astronomiques utilisés; elle donne parfois (mais pas toujours) des informations sur leurs dimensions et sur leur mode de construction. Sur ces illustrations, on voit la sphère armillaire méridionale (A), la sphère armillaire équatoriale (B), l'astrolabe armillaire (C), l'astrolabe armillaire (D). Ptolémée procède aussi à des mises en garde quant à certaines sources d'inexactitudes



dans l'utilisation de ces instruments, comme, par exemple, les erreurs dues à un mauvais positionnement ou à un mauvais étalonnage. A propos de la sphère armillaire équatoriale, il note qu'il suffit d'un écart de six minutes d'arc par rapport au plan de l'équateur pour entraîner une erreur de six heures dans le calcul de l'équinoxe. Parlant des cercles de bronze de la paléstre d'Alexandrie, il a cette remarque: « si grande est la déformation de leur position, notamment de celle du plus grand et du plus ancien d'entre eux, que lors-

exemple: « Vous ne trouverez ni nombre, ni poids pour déterminer ce qu'est un régime alimentaire correct, le seul critère étant les sensations du corps. »

Ce n'était pas une querelle de pure forme, car il avait une incidence directe sur la pratique pharmacologique. Alors que beaucoup d'experts s'étaient contentés de quelques vagues descriptions des drogues et de leur dosage, certaines recettes hippocratiques faisaient appel à la pesée ou à d'autres mesures de matières sèches ou liquides. Mais, quels qu'aient été les progrès vers la quantification, on était encore loin de la perfection; la quantification elle-même n'était souvent qu'une façade. Certains auteurs, en fait, critiquaient même la notion d'exactitude dans le dosage et la jugeaient trompeuse. Ils affirmaient que le traitement devait toujours être adapté au malade particulier, en fonction de son état, de sa robustesse, toutes choses qui n'ont rien à voir avec la pesée.

Un débat analogue réapparaît dans des contextes où l'exactitude prenait la forme non plus de la pesée, mais du comptage. Nombre d'auteurs de l'école hippocratique attachaient une grande importance à l'étude des rapports numériques pour la détermination des périodicités, aussi bien à propos des grossesses et des accouchements qu'à propos des divers stades des maladies et notamment de leurs phases critiques (c'est-à-dire des moments où se produisent aggravations ou rémissions). Dans ces deux domaines, certaines des idées exprimées reposaient sur des bases solides. Avant l'avènement des antibiotiques, des études ont révélé l'existence de périodicités marquées dans certaines affections aiguës (le paludisme, par exemple). Les thèses soutenues dans certains textes hippocratiques étaient toutefois extravagantes. Mentionnons par exemple l'idée selon laquelle les douleurs de la grossesse se produiraient selon un cycle bien précis (tous les trois jours quand le fœtus commence à bouger au bout de soixante-dix jours; et aussi le troisième jour après le cinquantième jour de la grossesse et le sixième jour après le centième); ou encore les combinaisons fort complexes de jours pairs ou impairs sur lesquelles reposeraient les périodicités relatives aux fièvres. En de tels cas, la recherche de l'exactitude ne débouche que sur une quantification trompeuse, sur une numérologie *ad hoc*, et non sur l'univers de la précision cher à Alexandre Koyré.

Si on fait un bilan, il apparaît donc qu'il est un peu trop simple de dire que les Anciens ont été totalement incapables de recourir aux mesures. Interrogeons-nous maintenant sur les causes épistémologiques de cette situation. Beaucoup considèrent que le principal facteur qui a joué contre l'utilisation des mesures a été l'influence du platonisme. Il faut cependant être prudent. Car s'il est vrai que Platon souligne que les phénomènes sensibles sont trompeurs dans certains contextes, il

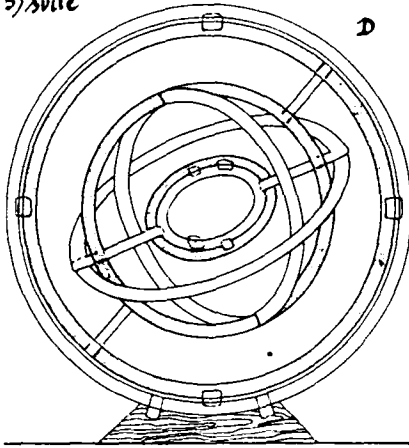
serait absurde de prétendre que toute la recherche menée par les Anciens sur la nature a été hypothéquée par une attitude de méfiance à l'égard des perceptions. Ce serait ignorer, pour commencer, que nombre de philosophes avaient adopté dans le débat épistémologique un point de vue diamétralement opposé à celui de Platon. Non seulement Aristote avait redonné un rôle important à la perception et proclamé que la nature pouvait faire l'objet de recherches précises, mais, à l'époque hellénistique, les deux grandes écoles positives de philosophie, celle des épicuriens et celle des stoïciens, avaient considéré la perception, d'une certaine manière, comme le fondement ultime de la connaissance.

Une conception réaliste de la mesure.

Bien que bon nombre parmi les grands savants n'aient pas pris directement part au débat épistémologique, rien ne permet de supposer que des hommes comme Aristoxène, Eratosthène, Hipparque, Poséidonios ou Ptolémée aient été animés d'un scepticisme radical quant à la valeur de la perception pour leurs recherches. Plusieurs textes mettent même l'accent sur les difficultés particulières que présente l'observation dans certaines circonstances. Mais c'est précisément parce que l'observation, normalement, ne se heurte pas à de telles difficultés que celles-ci méritent d'être soulignées lorsqu'elles se présentent. Il aurait été absurde de la part de Hipparque ou Ptolémée de critiquer leurs prédécesseurs pour l'imprécision de leurs observations astronomiques s'il y avait eu à leurs yeux des raisons épistémologiques fondamentales de considérer toutes les observations astronomiques (y compris les leurs) comme sujettes à caution. Ptolémée, tout particulièrement, reconnaît souvent les inexactitudes des informations astronomiques qu'il utilise, mais ce n'est ni par indifférence pour leur ampleur, ni parce qu'un quelconque principe métaphysique les lui ferait considérer comme négligeables. Au contraire, il prend toujours soin de souligner qu'il s'agit d'inexactitudes mineures et que toutes s'inscrivent dans des limites acceptables vu la nature du problème traité.

Peut-être est-ce paradoxal, mais le fait même qu'il ait pratiqué une certaine sélection et un certain ajustement de ses données en fonction de ses théories révèle chez lui cette conviction: observations et schémas théoriques peuvent et doivent s'accorder. C'est souvent vrai dans la *Syntaxe*; mais c'est encore plus frappant dans l'*Optique*. Ici, dans les tables de réfraction établies pour les trois couples de milieux étudiés, les résultats sont donnés comme corrects à un demi-degré près. Mais ils cadrent tous exactement avec la loi générale sous-jacente. Et pourtant cet aspect même de son travail (qui montre que Ptolémée a ajusté ses résultats) révèle également un autre aspect de sa pen-

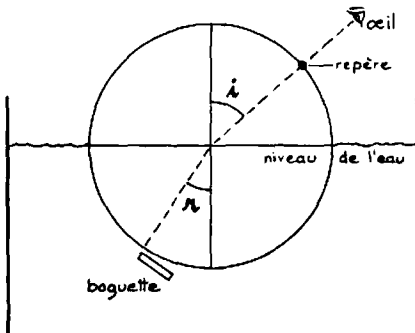
5) suite



que nous effectuons nos observations, il arrive que leurs surfaces concaves subissent par deux fois une modification d'éclairage durant la même équinoxe.»

0 (D'après C. Singer et al., *A History of technology*, vol. III, Oxford, 1957)

6) Ptolémée a décrit dans son *Optique* un appareil servant à déterminer la déviation angulaire subie par un rayon lumineux lorsqu'il passe de l'air dans l'eau et inversement (réfraction). C'est un disque dont les quadrants sont subdivisés chacun en quatre-vingt dix parties, comme le rapporteur; il est plongé dans l'eau de telle façon que le niveau de l'eau se confonde avec le diamètre horizontal. En un point donné de la circonférence du demi-cercle situé hors de l'eau (30° par exemple) est placé un repère de couleur :



L'observateur place alors son œil de façon à ce que le repère et le centre du disque soient vus dans un parfait alignement. Puis il déplace une baguette sur le quadrant opposé, situé dans l'eau, jusqu'à ce que l'extrémité de celle-ci apparaisse dans l'alignement du repère de couleur et du centre du disque. Cela per-

sée : il estime possible de parvenir à une parfaite adéquation entre les données observées et la théorie. Non seulement une concordance parfaite entre les généralisations induites des observations et la théorie, mais entre ce qu'il présente comme étant les résultats de l'observation eux-mêmes et cette théorie. On ne voit aucune trace ici des inhibitions engendrées par l'idée que les données ne peuvent pas s'adapter exactement au cadre théorique. Cet exemple montre au contraire que l'erreur est due, du moins en certains cas, au fait que l'on espère (ou que l'on suppose) possible une concordance trop étroite entre théorie et données.

« Tout est nombre. »

Je me suis attaché jusqu'ici aux aspects épistémologiques de la pensée grecque qui peuvent être considérés (ou qui ont été considérés) comme des obstacles à une prise de conscience de l'importance du quantitatif. Mais une autre grande idée des Anciens avait plutôt l'effet inverse, à savoir la doctrine pythagoricienne selon laquelle « tout est nombre ». Il est vrai que la signification de ce principe est très incertaine ; parfois même, il a pu engendrer un certain obscurantisme. La relation entre les « nombres » et les « choses » est en effet exprimée dans des termes différents, voire incompatibles, selon les sources relatives au premier pythagorisme. Tantôt il est déclaré que les choses sont des nombres ; tantôt qu'elles sont comme des nombres. Plus important encore, parmi les exemples cités à l'appui du principe, plusieurs n'ont rien à voir avec la science (ainsi quand le chiffre quatre est associé à la notion de justice).

Mais, dans d'autres contextes, la théorie selon laquelle « toute chose est nombre » pouvait agir — et a effectivement agi — comme un stimulus incitant à rechercher ces nombres en observant les phénomènes et en faisant des mesures. Les pythagoriciens n'étaient pas les seuls à rechercher des rapports numériques en étudiant le domaine de l'harmonie. Mais il est certain que l'expression des accords de l'octave, de la quinte et de la quarte en termes de rapports (1:2, 2:3, 3:4) représentait pour eux l'exemple parfait de la correspondance entre les nombres et les choses. Il fallait bien, pourtant, que ces rapports soient corroborés, sinon découverts, grâce à des données mesurables. Diverses recherches impliquant des mesures furent tentées non seulement sur le monocorde, mais aussi par exemple en mesurant les quantités d'eau contenues dans des verres qui, lorsqu'on les frappait, produisaient des notes différentes. Il est bien connu que les comptes rendus de ces recherches sont parfois extrêmement fantaisistes, notamment en ce qui concerne les résultats numériques obtenus. Mais cela ne retire rien à leur valeur en tant que témoignages sur le but de ces recherches : découvrir à l'aide de mesures les « nombres » présents dans

les « choses ». Même s'il faut rejeter certains détails rapportés dans ces comptes rendus, ils n'en illustrent pas moins la manière dont le pythagorisme pouvait stimuler l'étude quantitative des phénomènes.

Condamner la science antique comme si elle avait toujours été incapable de quantification est donc tout à fait abusif. Encore une fois, les présupposés épistémologiques et méthodologiques des Anciens n'étaient pas toujours ni partout défavorables à la recherche de l'exactitude sous l'une ou l'autre des deux formes qui nous intéressent ; c'est-à-dire premièrement dans la formulation des théories rigoureuses et deuxièmement dans la collecte de données précises. En ce qui concerne le premier point, l'application des mathématiques à la compréhension des phénomènes naturels était l'une des principales et des plus fructueuses préoccupations de la science antique. En ce qui concerne le second point, il y a des cas où les Grecs ont tout mis en œuvre pour constituer des bases de données larges et précises. De plus, certains hommes de science de l'Antiquité avaient parfaitement pris conscience du problème que posait le recours à la mesure : ils ne se contentaient pas de la pratiquer, ils l'avaient élevée au rang de concept.

Des quantifications abusives ou prématurées.

Reprocher aux Anciens de n'avoir pas recherché la précision revient à minimiser bon nombre de leurs travaux importants dans les sciences exactes. Une telle critique, en certains cas, est positivement fallacieuse : elle dénature les faits et trahit une erreur de jugement en ce qui concerne la principale faiblesse de la démarche des Grecs. Loin d'avoir été insuffisamment quantitative, en effet, la recherche dans le monde antique l'a parfois été à l'excès ; cela était dû en partie à l'influence des succès obtenus dans l'harmonie ou l'astronomie. Dans les spéculations auxquelles se sont livrés les Grecs au sujet de la nature, il est fréquent qu'on constate une quantification ou une mathématisation prématurée ou insuffisamment fondée. On peut citer comme exemple l'extrême complication des rapports numériques dans les théories sur la périodicité dans les maladies ; ou encore la tentative de Galien pour distinguer quatre degrés dans le chaud, le froid, l'humide et le sec. De même, dans diverses variantes de la théorie atomiste, les formes des atomes sont manipulées d'une manière géométriquement intéressante, mais presque totalement arbitraire. Les nombres et les rapports géométriques pouvaient ouvrir l'accès à une meilleure compréhension des phénomènes mais, souvent, ils étaient seulement considérés comme exprimant des valeurs symboliques. Le recours aux mathématiques avait fréquemment pour effet d'habiller les théories d'un faux air de certitude.

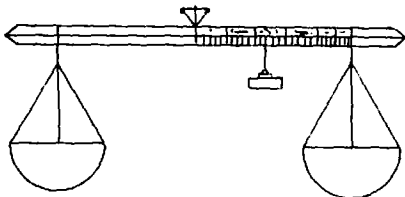
6) suite
met de déterminer l'angle de réfraction pour un angle d'incidence donné. (Pour Ptolémée, le rayon incident est celui qui part de l'objet). Les résultats sont donnés dans l'Optique sous forme de tables, mais, pour les trois couples de milieux étudiés, ces résultats sont conformes à une loi générale exprimée par :

$$r = ai - bi^2$$

r étant l'angle de réfraction, i l'angle d'incidence, et a et b des constantes correspondant aux milieux étudiés.

0 D'après G.E.R. Lloyd, *Greek science after Aristotle*, Londres, 1973)

7) C'est dans les corps flottants qu'Archimède énonce le principe qui porte son nom : « tout corps solide plongé dans un liquide, s'il est plus lourd que celui-ci, se trouve alors réduit d'un poids égal à celui d'une quantité de liquide de même volume que lui ». Une source arabe (Al-Idharini, *Kitab Mizan al-Hikma*) attribue à Archimède l'invention d'une balance à poids mobile dont on voit le schéma :



A gauche, le plateau pour l'or, à droite celui pour l'argent, lorsqu'on place sur les plateaux des poids égaux des deux métaux et qu'on plonge l'instrument dans l'eau, le plateau de gauche s'incline. En notant la position qu'il faut donner au poids mobile pour restaurer l'équilibre, on peut connaître les poids spécifiques relatifs des deux métaux.

0 D'après W.R. Knorr, « Ancient and medieval balances », in *Annali dell'Istituto e Museo di Storia della Scienza*, supplemento 1982, 2)

(1) Première parution dans *Critique*, n° 28, 1948. Réédition dans A. Koyré, *Etudes d'histoire de la pensée philosophique*, A. Colin, 1961.

comme si des chiffres précis équivalaient à une réelle fidélité aux faits. Toujours est-il que ce trait caractéristique de certains travaux de l'Antiquité (à savoir la recherche de l'exactitude là où celle-ci n'est pas de mise) a fait lui-même l'objet de critiques de la part d'autres auteurs anciens, par exemple de la part de ces médecins qui protestaient contre certaines tentatives visant à faire de la médecine une science exacte.

Bien qu'il faille apporter d'importantes modifications à la thèse qui caractérise la science antique comme essentiellement quantitative, cette thèse a néanmoins une certaine validité. La dynamique et la théorie des éléments, par exemple, ont rarement fait appel à la mesure ; même quand des mesures ont été réalisées, les résultats effectifs ne sont généralement pas mentionnés dans les textes. Dans certains domaines de recherches, la manière dont les Anciens formulaient les problèmes orientait l'attention vers les aspects qualitatifs et non quantitatifs. Les instruments permettant d'effectuer des mesures étaient de précision variable (ce qui était à la fois un symptôme et une cause du problème) ; ils permettaient de faire des pesées ou de mesurer des longueurs et des volumes de taille moyenne, mais ne permettaient pas de mesurer correctement de courts laps de temps. L'exemple de l'astronomie montre que, quand les motivations étaient suffisantes, les Grecs étaient capables de mettre au point des instruments perfectionnés. Mais, en général, les progrès des instruments de mesure sont restés modestes. En dehors de l'astronomie, c'est surtout dans la pesée et le dosage des ingrédients entrant dans la composition des drogues que les Anciens ont recouru de façon habituelle aux techniques de mesure. On notera tout d'abord qu'il s'agit là d'une simple application des procédés utilisés sur les marchés ; et aussi que, là encore, l'exactitude était souvent illusoire.

Il est trop simple de dire que la grande faiblesse de la science grecque tenait à une mauvaise appréciation de la valeur des mesures exactes. Ce qui a manqué aux Grecs, en fait, c'est de pratiquer des mesures dans le cadre de problèmes bien définis, et seulement dans ce cadre ; étant bien entendu, naturellement que nul homme de science, ancien ou moderne, ne peut dire à l'avance quels sont les problèmes susceptibles d'être correctement résolus grâce à cette méthode particulière.

Le pouls et la théorie musicale.

Un dernier exemple nous permettra de mettre ce point en lumière. La découverte de la valeur diagnostique du pouls, attribuée à Praxagoras (c. 300 av. J.-C.), fut sans aucun doute d'une importance primordiale pour la médecine. Dès la génération suivante, Hérophile poussa très loin la théorie des différents types de pouls, dont il entreprit avec ses disciples la classification systématique selon divers

critères : « amplitude », « rapidité », « intensité », « rythme », « égalité », « régularité ». Il avait compris que la fréquence du pouls varie avec l'âge et identifié trois grands types d'anomalies : pararythmie, hétérorhythmie, ekrythmie. Galien indique que c'est en partie sous l'influence de la théorie musicale qu'est née l'idée d'une théorisation quantitative du pouls : « De même que les musiciens établissent les rythmes selon certaines séquences précises d'unités de temps, en comparant le levé et le frappé (le temps faible et le temps fort), de même Hérophile voit dans la dilatation de l'artère un phénomène analogue au levé, et dans sa contraction, un phénomène analogue au frappé. » Le point intéressant, c'est que, pour suivre les explications d'Hérophile, il fallait s'y connaître en théorie musicale.

En examinant cette recherche (qui se poursuit jusqu'à Galien et au-delà), on voit se dégager trois particularités remarquables. D'abord, il était difficile de mesurer exactement les courts laps de temps en question. D'après l'historien Ammien Marcellin, Hérophile ne se découragea pas et inventa une horloge à eau portative, réglable suivant l'âge du patient ; mais on ignore quelle précision il en obtenait ou espérait en obtenir. Ensuite, on constate que les Grecs ont eu la volonté de transformer cette recherche en recherche exacte, d'élaborer une théorie du pouls sur le modèle de la théorie musicale (qui avait réussi à mathématiser les phénomènes harmoniques). Si les principaux accords pouvaient s'exprimer par de simples rapports numériques, pourquoi n'en irait-il pas de même avec les rapports existant entre les dilatations et les contractions des artères ? Mais il est clair, enfin, qu'on est une fois de plus en présence d'une quantification prématurée ou insuffisamment étayée. Comme pour les recherches hippocratiques sur la périodicité dans les maladies, on constate que les théorisations sur le pouls ont pour point de départ quelques données réelles : mais ces données ne pouvaient pas servir de base à des spéculations théoriques d'une telle complexité. La tentative faite pour réduire les données relatives au pouls à des rapports mathématiquement exprimables montre comment les Anciens exerçaient parfois leur ingéniosité ; mais elle illustre également pourquoi cette ambition pouvait, dans la pratique, conduire à certaines impasses.

Pour en savoir plus

- A. Koyré, *Etudes d'histoire de la pensée philosophique*, A. Colin, 1961.
- T.S. Kuhn, *The essential tension*, University of Chicago, 1977.
- S. Sambursky, *The physical world of the Greeks*, Routledge and Kegan Paul 1956.
- G.E.R. Lloyd, *The revolutions of wisdom*, University of California Press, 1987.
- G.E.R. Lloyd, *Les débuts de la science grecque. De Thalès à Aristote* (trad. fr.), François Maspero, 1974.