



HAL
open science

Mécanique et mathématiques à Alexandrie : le cas de Héron

Bernard Vitrac

► **To cite this version:**

| Bernard Vitrac. Mécanique et mathématiques à Alexandrie : le cas de Héron. 2003. hal-00175171

HAL Id: hal-00175171

<https://hal.science/hal-00175171>

Preprint submitted on 27 Sep 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Introduction : qui est Héron ?

Comme pour la très grande majorité des mathématiciens grecs anciens, nous ne savons rien de la vie de Héron. Il vécut à l'époque impériale, entre le I^e et le III^e siècle de notre ère, très certainement à Alexandrie. La datation de Héron est une question compliquée qui a une longue histoire au cours de laquelle des réponses passablement divergentes ont été proposées, du II^e s. avant notre ère jusqu'au III^e s. après ! En 1938 Otto Neugebauer a identifié l'éclipse rapportée à la fin du traité de la *Dioptré*² — elle a eu lieu le 13 Mars 62 — et il s'est efforcé de montrer que l'auteur l'avait observée personnellement. A quelques rares exceptions près, les auteurs récents se sont ralliés à son point de vue et place donc Héron au milieu du premier siècle de notre ère³. Les arguments avancés ne sont guère décisifs, en particulier l'authenticité héronienne de la section 35 du traité de la *Dioptré* n'est pas complètement incontestable. C'est pourquoi je donne une fourchette chronologique extrêmement large.

Sous son nom nous a été transmis un important corpus de textes. Sous réserve des difficiles problèmes d'authenticité, globale ou partielle, qui se posent pour certains des écrits que la tradition et les manuscrits lui attribuent, c'est une source essentielle pour notre connaissance des sciences mathématiques grecques anciennes. Dès ce niveau purement descriptif on voit que le corpus héronien, du moins aux yeux des historiens des sciences modernes, se divise aisément en deux catégories assez distinctes de textes : d'une part des ouvrages de mathématiques, d'autre part des traités qu'on peut, faute de mieux, qualifier de "techniques". Cette dichotomie est facile à dépasser : les historiens opposent souvent commodément deux types de mathématiciens anciens : le mathématicien "pur", par exemple Euclide ou Apollonius, et le mathématicien-ingénieur, tel

¹ J'ai présenté certaines portions de ce texte dans différents séminaires d'histoire des sciences, notamment le Seminario Orotava de Historia de la Ciencia, animé par J. L. Montesinos (Ténérife, 21/10/98; Las Palmas de Gran Canaria, 22/10/98), le Séminaire du Centre Koyré consacré aux représentations des mathématiques, animé par Amy Dahan-Dalmedico et J. Peiffer (07 et 21/01/99), et le Séminaire d'Histoire des Sciences de l'Antiquité à l'Age classique du Centre d'histoire des sciences et des philosophies arabes et médiévales du CNRS (28/02/2003). Je remercie tou(te)s les participant(e)s à ces stimulantes réunions pour leurs remarques et critiques. Je remercie plus particulièrement Anca Vasiliu et les responsables de la revue *Oriens-Occidens* de me donner l'occasion de publier ce travail.

² V. Section 35, ed. Schöne, p. 302, l. 22-28. Les références complètes des éditions et études citées sont données dans la bibliographie à la fin de ce travail.

³ V. aussi [Neugebauer, 1969], p. 178 (note au § 61), [Drachmann, 1950] et le résumé détaillé de la discussion dans [Giardina, 2003], pp. 88-93 qui adopte, elle aussi, cette chronologie. D. Raños, 2000, essaie de confirmer la deuxième moitié du I^{er} s. comme étant l'époque des travaux de Héron, tandis que P. Souffrin, 2000 et N. Sidoli, 2005 ont souligné les incertitudes qui entourent l'identification de la fameuse éclipse.

Archimède et aussi, bien entendu, Héron. Le double statut des seconds est censé expliquer leur éclectisme. J'ai de bonnes raisons de penser que cette opposition est assez factice et, de surcroît, qu'elle a surtout comme conséquence d'éviter de délicates questions sur la définition et le statut de la mécanique chez les Anciens ainsi que sur la nature de l'articulation éventuelle entre mathématiques et mécanique chez les Grecs anciens en général, et chez Héron en particulier.

Au demeurant, ce que Héron — comme tout autre auteur ancien — représente pour nous, modernes, dépend non seulement de la question documentaire évoquée précédemment, mais aussi des conceptions historiographiques dominantes en histoire des sciences. Tant que l'on a connu Héron pour l'essentiel par ses *Pneumatiques* (dont le succès a été constant durant le Moyen-Âge et la Renaissance), son traité sur les machines de guerre (*Belopoiica*), sa *Dioptré*, et les manuels mathématiques élémentaires du corpus (désormais considérés comme inauthentiques !), il est vrai que l'opinion qu'on s'est faite de lui n'était guère flatteuse : au mieux un technicien et un arpenteur, au pire un artisan dépourvu de toute connaissance scientifique. C'était le point de vue dominant avant qu'on ne prenne connaissance, presque simultanément, de ses *Mécaniques*, éditées et traduites en français pour la première fois par Carra de Vaux en 1893, et de ses *Métriques*, dont l'existence était connue de manière indirecte par quelques citations, mais dont l'unique manuscrit conservé fut retrouvé par P. Schöne en 1896. La dimension savante et lettrée de l'auteur ne pouvait alors plus faire de doute et on n'a pas manqué de souligner le caractère encyclopédique de sa production.

Cela dit, l'histoire des sciences de l'époque s'attachait avant tout aux découvertes et autres innovations scientifiques. L'intérêt d'un auteur était évalué en fonction de l'originalité que l'on croyait pouvoir reconnaître à ses travaux. Dans ce contexte, si l'intérêt de Héron comme source allait désormais de soi — en témoigne la belle édition critique de ses œuvres dans la *Bibliotheca Teubneriana* —, il n'en était pas moins présenté comme un auteur en soi peu intéressant, surtout animé de préoccupations pédagogiques, et très peu original. C'est à peu près le jugement que porte Heath. Pour prendre l'exemple des mathématiques, le texte des *Métriques* nous apportait le premier témoignage sur deux procédures de calcul auxquelles la tradition scolaire, du moins française, accole aujourd'hui le nom de « formules de Héron » : l'une permet de trouver l'aire d'un triangle quelconque à partir de ses côtés, sans connaître la hauteur; l'autre explicite la manière de calculer des racines carrées approchées de nombres non carrés parfaits. Les commentateurs ont surtout souligné le fait que ces résultats étaient bien antérieurs à notre mécanicien, spéculant sur l'inventeur de la première formule qui pourrait bien être Archimède. Dans le même ordre d'idées, les *Mécaniques* exposaient la méthode pour déterminer deux moyennes proportionnelles entre deux droites données, méthode déjà connue par le traité des *Machines de guerre*, et également mentionnée par Pappus et Eutocius. Les historiens ont bien évidemment souligné qu'elle différait assez peu de celle, antérieure, de Philon de Byzance⁴; ils ne se sont guère demandé pourquoi ce problème avait l'air si important pour les mécaniciens anciens.

⁴ Eutocius, sans doute moins sensible à la chronologie, remarque que celle de Philon diffère très peu de celle de Héron, exposée auparavant !

Dans ce travail il sera question de deux "personnages" principaux : la mécanique des Anciens et Héron. La discipline a un statut plutôt controversé, notamment — mais pas seulement — dans la problématique de la classification des sciences mathématiques⁵. Le phénomène ne se limite d'ailleurs pas à la mécanique. Plus généralement il y a eu des débats quant à la définition des différentes spécialités mathématiques, à leurs objets et à leurs finalités, à leur articulation mutuelle, à leurs rapports avec la philosophie. Mais le cas de la mécanique est particulièrement exemplaire et peut-être le moins mal documenté (avec celui de l'astronomie). Je lui consacrerai ma première partie. J'examine ensuite les tentatives de mathématisation partielle de cette spécialité. Dans la troisième et dernière partie je propose, à la lumière de ce qui précède, mais aussi grâce aux préfaces de Héron, une sorte de réhabilitation de celui qui n'était pas un obscur artisan, mais un technicien cultivé, défendant l'utilité des techniques — rhéteur quand il le jugeait utile —, et fin lettré.

I. Le statut controversé de la mécanique en Grèce ancienne

La plus ancienne occurrence de l'adjectif qualificatif "méc(h)anique" ("μηχανικός, ἡ, όν") connue de nous se trouve semble-t-il chez Aristote (IV^e siècle avant notre ère)⁶ : elle désigne *une spécialité scientifique*⁷. Les cursus d'enseignement de l'Antiquité tardive, basés sur l'étude et le commentaire des écrits faisant autorité, commençaient souvent par l'examen des différentes définitions que les auteurs antérieurs avaient données de la spécialité enseignée. Nous leur devons ainsi la compilation de *définitions* de la géométrie, de la géodésie, de l'optique ... Peut-être certaines d'entre elles sont-elles d'origine hellénistique. Malheureusement nous n'avons pas, à strictement parler, de *définition* de la mécanique. Cela dit, il ne manque pas de textes qui éclairent ce que les Anciens entendaient par "mécanique". Il me paraît préférable de partir de ces témoignages plutôt que d'une définition ou d'une description moderne de la science mécanique, confrontée ensuite avec ce que nous pouvons savoir de celle des Anciens. Même si la démarche peut être très éclairante, elle n'est pas sans risque et l'anachronisme ou la mésinterprétation nous guette.

J'ai donc procédé d'une manière extrêmement simpliste, en distinguant deux étapes :

- La délimitation d'un certain corpus de textes, explicitement qualifiés par les Anciens eux-mêmes de "mécaniques", ou étroitement rattachés à cette spécialité.
- L'examen de quelques témoignages que je qualifie de "réflexifs", en ce sens que leur propos est de caractériser, d'une manière ou d'une autre, la mécanique. Ces textes réflexifs, comme mon titre

⁵ Nous connaissons cette thématique de la classification des sciences mathématiques pour l'essentiel grâce aux préfaces des traités mathématiques ainsi qu'à quelques textes philosophiques : l'*Introduction arithmétique* de Nicomaque de Gérase et ses commentateurs; le premier Prologue du *Commentaire au livre I des Éléments* d'Euclide par Proclus de Lycie; les commentateurs d'Aristote ...

⁶ Dans la même famille lexicale on trouve des termes nettement plus anciens, comme le substantif "μηχανή" (machine, moyen, expédient, machination, habileté...), le verbe "μηχανάω-ω" (imaginer, tramer, machiner, fabriquer avec art, causer...).

⁷ V. *An. post.*, I, 9, 76a24; I, 13, 78b37; *Met.*, M, 3, 1078a16.

l'indique, ne s'accordent pas entre eux. J'ai cru bon d'introduire une distinction supplémentaire entre les témoignages qui proviennent des "mécaniciens", lesquels tentent de circonscrire leur discipline par des considérations de type classificatoire, et le récit historique qui a les faveurs de Plutarque. Seul le témoignage de Pappus combine les deux approches.

A. Le corpus

Le noyau du corpus que j'ai utilisé est constitué de cinq textes, désignés ou qualifiés par leur auteur, ou par la tradition, de "mécaniques". Même s'il y a des fluctuations sur les titres des écrits anciens et s'ils ne sont pas nécessairement dus aux auteurs eux-mêmes, je ne crois pas qu'il y ait de doute que ces écrits se rattachent à cette spécialité, entendue au sens ancien du terme. En voici la liste⁸ :

(i) Les *Μηχανικά* (sous-entendu *προβλήματα*) du corpus aristotélicien.

Sans doute le plus ancien texte de mécanique conservé en grec⁹. Nous n'en connaissons pas l'auteur. Certains pensent qu'il s'agit d'Aristote lui-même, d'autres préfèrent y voir un disciple proche, peut-être Straton de Lampsaque. Il s'agit d'un recueil de 35 problèmes, introduisant souvent une recherche causale¹⁰ et précédés d'un fort intéressant préambule sur lequel je reviendrai dans la section consacrée aux témoignages réflexifs.

(ii) *La composition mécanique* (*Μηχανική συντάξις*) de Philon de Byzance (fl. vers 225^a), en neuf Livres (au moins) :

L. I : Εἰσαγωγή (Introduction)

L. II : Τὰ μοχλικά (Des leviers)

L. III : Τὰ λιμενοποιικά (Construction des ports)

L. IV : Τὰ βελοποιικά (Machines de jets). Conservé en grec

L. V : Τὰ πνευματικά (Pneumatiques). Partiellement conservé en arabe

L. VI : Τὰ αὐτοματοποιικά (Construction des automates)

L. VII : Τὰ παρασκευαστικά (Fortifications). Conservé en grec

L. VIII : Τὰ πολιορκητικά (Poliorcétique). Conservé en grec

L. IX : Περὶ ἐπιστολῶν τῶν κρυφαίως ἀποστελλομένων (Sur les messages secrets)

⁸ J'y ajoute quelques indications sur les plans des ouvrages de Philon, Héron, Pappus et Vitruve pour que ceux qui ne sont pas familiers avec cette littérature se fassent une petite idée des thèmes abordés.

⁹ Dire qu'il s'agit du plus ancien texte de mécanique *conservé* supposerait d'avoir tranché l'insoluble question de l'authenticité des fragments mécaniques attribués à Euclide et la chronologie de l'auteur des *Mechanika* par rapport à celui des *Éléments*. Au demeurant le *Liber Euclidis de ponderoso et levi* est conservé en latin, sans doute dans une traduction de Gérard de Crémone elle-même réalisée sur une version arabe probablement due à Yābit ibn Qurra (v. [Moody, E. A. & Clagett, M., 1960], pp. 23-31). Quant au *Livre d'Euclide sur la balance*, il est conservé en arabe et a été édité et traduit en français dans [Woepcke, 1851].

¹⁰ Par exemple : « Pourquoi les balances plus grandes sont-elles plus précises que les plus petites ? ». Cette tradition du problème déborde largement le cadre des mathématiques, y compris dans le corpus aristotélicien. V. le recueil en 38 Livres (!) édité et traduit par P. Louis sous le titre *Problèmes*.

Le titre est mentionné par Philon lui-même et la reconstruction partielle de ce qui apparaît comme une encyclopédie est possible à partir des auto-citations de l'auteur, en particulier dans les préfaces ou introductions des livres conservés. Philon est également cité par Vitruve (*De Arch.*, L. VII, præf.), Héron (*Autom.*, XX. 1 et 3), Pappus (*Coll.*, VIII, Prop. 10 et § XXXI) et Eutocius (*in Arch. SC* II. 1). Philon lui-même se réfère à Ctésibios d'Alexandrie, à ses discussions avec des ingénieurs alexandrins et rhodiens.

Cette somme représentait vraisemblablement la synthèse et le bilan des productions antérieures en matière de techniques, procédant un peu dans le même esprit que l'encyclopédie mathématique d'Euclide (arithmétique, géométrie, astronomie, musique, optique, catoptrique, peut-être mécanique), et que l'on retrouvera, plus tard, dans les grandes compositions ptoléméennes. La *syntaxe*, si l'on s'en tient au titre, implique un projet ambitieux, à comparer avec celui de l'*Almageste* de Ptolémée (en grec la *Syntaxe mathématique*). Pour certains historiens, ces grandes synthèses techniques sont caractéristiques de l'École d'Alexandrie.

(iii) les *Μηχανικά* de Héron d'Alexandrie, en trois Livres. Quelques fragments en grec. Conservés dans la traduction arabe de Qusṭā ibn L'qā. Le début du Livre I, vraisemblablement intitulé¹¹ *Μηχανικάί εισαγωγαί*, est perdu. Subsistent¹² :

- L. I, §§ 2-8 : "cinématique" du point, en particulier sur un ou des cercles;
- §§ 9-19 : problèmes d'échelle (notamment le problème des 2 moyennes);
- §§ 20-23 : mise en mouvement horizontal, oblique, vertical;
- §§ 24-34 : centres de gravité; soutien; suspension.

Dans cette partie la référence est Archimède. Sont cités de lui : *Sur l'équilibre des figures* ; *Sur les supports*; *Sur les leviers* .

L. II, §§ 1-32 : Présentation, causes et utilisation des 5 machines simples (treuil, levier, moufle, coin, vis). Combinaison de machines simples ...

§§ 33-34 : 17 problèmes, dans le style aristotélicien, portant presque tous sur des questions de facilité ou de difficulté relative pour certains mouvements.

§§ 35-41 : Retour aux centres de gravité. Répartition des poids sur des supports.

L. III, §§ 2-12 : Machines d'élévation.

§§ 13-21 : Pressoirs.

Héron a aussi manifestement repris et sans doute corrigé et développé certaines monographies de son prédécesseur Philon, notamment dans ses *Pneumatiques* (*Τὰ πνευματικά*), *Construction des automates* (*Τὰ αὐτοματοποιικά*) et *Machines de jets* (*Τὰ*

¹¹ Eutocius cite Héron sous ce titre (*Comm in SC* II. 1, ed. Heiberg, p. 58, l. 15). C'est d'ailleurs ce que suggère la conclusion dudit Livre I : « Ce livre suffit comme première introduction aux arts mécaniques. Dans ce qui va suivre... ». Trad. [Carra de Vaux, 1894], p. 92: réed. 1988, p. 112.

¹² Dans les manuscrits et éditions le début du Livre I (§ 1) traite du problème : « Mouvoir un poids donné avec une force donnée au moyen d'un train d'engrenages », manifestement repris au traité perdu du *Baroulkos*. Le même problème est traité au Ch. XXXVII de la *Dioptré* de Héron et dans la Prop. VIII. 10 de la *Collection* de Pappus. Dans ce qui suit je me réfère à [Carra de Vaux, 1894].

βελοπικὰ)¹³. La préface au traité sur les machines de jets est un très intéressant texte polémique aux dépens des philosophes.

(iv) L'*Introduction mécanique* de Pappus d'Alexandrie, qui n'est pas très différente de ce qui, pour nous, est le Livre VIII de la *Collection*, lequel a manifestement circulé indépendamment sous ce titre — c'est ainsi qu'il est cité par Eutocius — et qui a été traduit en arabe¹⁴.

La confrontation avec le texte grec serait intéressante car celui-ci présente d'évidents problèmes de plan¹⁵.

Prop. 1-7 : Pappus dit qu'elles sont théoriques (elles portent sur les centres de gravité)

Prop. 8-10 : Pappus dit qu'elles appartiennent à la théorie mécanique (plan incliné; baroukos)¹⁶.

Prop. 11-14 : problèmes géométriques résolues de manière "instrumentale" (pb des 2 moy.; ellipse)

Prop. 15-18 : problème relatif à une sphère

Prop. 19 : le problème des 7 hexagones

Prop. 20-24 : Retour et conclusion sur le baroukos (!) puis :

Exposé des cinq machines simples d'après les livres de Héron

Extraits du Livre III des *Mécaniques* de Héron sur les machines de levage.

On peut distinguer deux grandes parties dans cette introduction : l'une sous forme de Propositions numérotées, réparties par Pappus lui-même ou son éditeur en différents groupes, l'autre, constituées d'extraits de Héron, explicités comme tels, dont le mérite essentiel est donc de nous transmettre le texte grec de quelques fragments des *Mécaniques* dudit Héron.

(v) J'ai ajouté à cette liste le dixième Livre du *De Architectura* de Vitruve, composé vers 25 avant notre ère.

Celui-ci affirme en effet que l'architecture se divise en trois parties (L. I, III, 1) : la construction (*ædificatio*), la gnomonique et la mécanique (*machinatio*), entendue ici comme "art des machines". Ceci correspond au plan de son traité, respectivement aux Livres I à VIII, IX, X¹⁷.

¹³ Ces monographies ne sont peut-être que des fiches documentaires sur différentes machines, l'équivalent d'un traité-liste médical, éminemment descriptif et assez peu explicatif, mais elles procèdent cependant avec méthode. De plus la description permet les classifications, explique les règles de construction, le mode d'emploi; énumère les variantes que l'on peut introduire. De ce type de travaux relève également le Livre III des *Mécaniques*. Hormis les machines de guerre, la mathématisation y paraît limitée. En revanche certaines discussions de philosophie naturelle s'y introduisent facilement, comme l'existence ou non du vide, la compressibilité ou non de l'air, de l'eau. Le mécanicien doit alors se faire "physicien". La longue préface de Héron aux *Pneumatiques* est un des meilleurs exemples du genre.

¹⁴ V. [Pappus/Jones, 1986], p. 9 et [Jackson, 1972].

¹⁵ De plus le texte arabe de l'*Introduction* est plus complet que celui du Livre VIII de la *Collection* et mentionne des constructions géométriques réalisées avec une règle et un compas à ouverture fixée. V. [Jackson, 1980].

¹⁶ Ici Pappus se réfère aux *Mécaniques* de Philon, de Héron et au *Περὶ ζυγῶν* (*Sur les balances*) d'Archimède; dans sa préface, il s'était référé aux *Corps flottants* et à un ouvrage sur la sphéropée du Syracusain.

¹⁷ §§ 1. 1-6 : Définition et historique; §§ 2. 1-9.7 : Mécanique civile (machines de levage, de traction, pour élever l'eau, orgue hydraulique, hodomètre); §§ 10-15.7 : Les machines de siège (balistes, béliers, tortues); §§ 16. 1-12 : La défense (4 exemples de sièges : Rhodes, Chio, Apollonie, Marseille).

Qui plus est, sans vouloir dénier toute originalité à ce texte latin, unique en son genre, il est clair, d'après Vitruve lui-même, que ses sources, outre l'enseignement qu'il a reçu de ses maîtres romains et son expérience personnelle, sont essentiellement des écrits grecs.

Le lecteur s'étonnera peut-être de ne pas voir inclus dans notre liste les deux traités statiques d'Archimède (*Équilibres-plans* ; *Corps flottants*), une des plus grandes réussites de la mécanique ancienne d'un point de vue moderne rétrospectif. En fait nous verrons dans la suite de cet exposé que le rôle d'Archimède, le nombre et la nature de ses écrits dans le domaine ont été l'objet d'une controverse chez les Anciens sur laquelle je ne voudrais pas anticiper. Comble de malchance, les deux traités en question nous sont parvenus dépourvus des lettres-préfaces que l'on trouve pour certains écrits géométriques du Syracusain (ceux qu'il a envoyés à Alexandrie). Si celles-ci ont existé et si elles nous étaient parvenues, nous en saurions sûrement un peu plus sur ce qu'Archimède lui-même pensait du statut de la mécanique. Certaines indications quelque peu incertaines¹⁸ laissent penser qu'il considérait sa théorie des centres de gravité, et en particulier les résultats de ses *Équilibres-plans*, comme faisant partie des "éléments" de la mécanique¹⁹. Dans mon corpus je n'ai pas non plus inclus différents traités conservés consacrés aux machines de guerre (Biton, Athénée, Héron ...). Cette spécialité m'a paru suffisamment représentée par le Livre IV de la *Syntaxe* de Philon et la troisième partie du chapitre X du *De architectura* de Vitruve.

A partir de Vitruve et Héron — ce qui correspond à la deuxième période d'activités des institutions savantes d'Alexandrie —, les auteurs mécaniciens, comme plus généralement les auteurs scientifiques, développent la composante érudite de leur travail. Contrairement aux auteurs hellénistiques, par exemple Philon de Byzance, ils n'hésitent pas à fournir des références livresques. On peut donc enrichir notre corpus grâce aux auteurs et aux ouvrages qu'ils citent comme relevant du domaine de la mécanique. Vitruve et Héron citent Philon, Pappus cite Philon et Héron, mais surtout, fait majeur, tous citent celui qu'ils considèrent comme le plus grand des mécaniciens grecs, Archimède. Outre les deux traités de statique qui nous sont parvenus (*Équilibre des figures planes*, *Corps flottants*), ils mentionnent également : *l'Équilibre des figures solides*, *Sur les supports*, *Sur les leviers*, *Sur les balances*, et un ouvrage consacré à la *Sphéropée*. L'extension de notre corpus pourrait encore se poursuivre en tenant compte des

¹⁸ V. *infra*, n. 20.

¹⁹ Ce qui n'est pas compatible avec l'interprétation de certains auteurs modernes (K. Jaouiche, P. Souffrin par exemple) qui incluent la théorie des centres de gravité dans la géométrie. Cette interprétation n'est pas non plus compatible avec ce qu'Archimède dit de sa célèbre méthode (mécanique !). En outre, assimiler la statique archimédienne à la moderne théorie des barycentres suppose de disposer d'un corps de nombres représentant les "masses" associées à chaque point d'un espace affine... Archimède ne disposait pas du demi-corps des réels strictement positifs. Ses poids étaient des... poids ! Il y a donc tout lieu de croire qu'il envisageait sa statique comme une science « mixte » (d'où, dans la *Méthode*, sa réticence vis-à-vis de l'usage des preuves mécaniques en géométrie, qu'il prétend cantonner à un rôle purement heuristique). Cette attitude n'est pas incompatible avec la volonté de ramener les problèmes mécaniques, portant sur des corps physiques, aux propriétés géométriques des figures auxquelles on peut assimiler lesdits corps.

ouvrages que le texte d'Archimède lui-même mentionne — apparemment des auto-citations²⁰ —, même si l'on peut craindre que ces références soient inauthentiques.

Quoi qu'il en soit, avec ce corpus nous avons une première idée de ce que les Grecs entendent par "mécanique", du moins ceux qui se réclament de cette discipline. On distingue clairement différents types d'investigations et de savoirs :

- L'un concerne la description, la procédure de construction et l'usage de machines. La composante militaire est extrêmement importante, notamment chez Philon. Cela tient peut-être aux fonctions de l'auteur ou au public visé : on s'est interrogé, sans grand succès, sur l'identité du dédicataire de la *Syntaxe*, un certain Ariston, envisageant qu'il pouvait s'agir d'un ingénieur militaire.
- Un autre s'intéresse aux causes permettant d'expliquer le fonctionnement et l'éventuelle efficacité de ces machines. Ce genre d'investigation peut être de type physique; c'est ce que l'on observe par exemple dans certains des problèmes aristotéliens et dans une partie du Livre II de Héron. Mais il y a aussi une tentative de réduction à des principes mathématiques, en l'occurrence géométriques.
- Cette mathématisation est évidemment très partielle; elle s'exerce surtout dans l'analyse des machines simples (première partie du Livre II de Héron) et dans les traités de construction de machines de guerre. C'est là que nos mécaniciens proposent leur solution au problème des deux moyennes, présenté comme une généralisation du fameux problème de la duplication du cube. Des domaines comme la poliorcétique ou les constructions d'automates ne sont pas concernés par cette mathématisation.
- Chez Héron et Pappus, les principes mathématiques constituent les *Introductions à la mécanique*, premier Livre²¹ ou première partie de leur exposé. Ils s'y réfèrent aux travaux statiques d'Archimède, en particulier à sa théorie des centres de gravité. De tels prolégomènes étaient très certainement l'objet des Livres I et II de la *Syntaxe* de Philon (le Livre II était intitulé *μοχλικά*). Le même mouvement s'observe déjà dans le texte aristotélien dont les premiers problèmes, comparés aux suivants, sont plutôt théoriques et géométriques. Ces textes introductifs, de par leur nature même, supposent un long travail préalable de "réduction" des problèmes, d'analyse des dispositifs et des solutions, la mise en évidence d'"éléments" communs à plusieurs situations.
- Ces "réductions" peuvent rester mécaniques dans leur formulation. Par exemple, de même qu'il y a cinq éléments dans la physique aristotélienne, cinq polyèdres réguliers en mathématiques, il existe cinq machines simples, et cinq seulement grâce aux combinaisons desquelles on peut réduire, en principe, toute machine complexe. De surcroît on explique leur efficacité — la

²⁰ *Τὰ μηχανικά* et un autre ouvrage non spécifié in *QP* 6 (référence à *EP* I. 14 et à un autre résultat qui ne figure pas dans *EP*); *Τὰ μηχανικά* in *QP* 10 (référence à *EP* I. 15); *Αί Ἴσορροπίαι* in *CF* II. 2 (pour un traité sur les centres de gravité des solides, en l'occurrence celui du paraboloïde); *Τὰ Στοιχεῖα τῶν μηχανικῶν* in *CF* II. 2 (référence à *EP* I. 8); *Τὰ Ἴσορροπικά* in *Meth.* 1 (référence à *EP* I. 15).

²¹ V. *supra*, n. 11.

possibilité de mouvoir un grand poids avec une faible force — en les ramenant à l'une d'entre elles, le levier. L'influence des sciences, en particulier des mathématiques, se retrouve donc au niveau de la forme littéraire d'exposition et du modèle intellectuel que celle-ci présuppose²².

J'ajouterai deux remarques :

1. Tout aussi intéressant que ce que ces ouvrages contiennent, est ce qu'ils ne contiennent pas. La mécanique ancienne n'est pas la technologie. Il suffit par exemple de comparer la liste des thématiques que nous venons d'indiquer avec les éloges des techniques que font les Tragiques du V^e siècle avant notre ère, je pense évidemment aux très célèbres passages de l'*Antigone* de Sophocle (v. 332-375) et du *Prométhée enchaîné* attribué à Eschyle (v. 450-468 + 479-500). Les τέχναι mentionnées dans ces discours clairement anthropologiques indiquent la place de l'homme vis-à-vis de la nature et de la surnature. Sont énumérées : l'agriculture, la chasse, la pêche, la domestication des animaux, des inventions comme le joug et le harnais, la métallurgie, τέχναι qui manifestent les possibilités de domination de l'homme sur certains éléments de la nature — dans le même ordre d'idées Eschyle et Sophocle citent aussi la navigation — ou encore des techniques qui assurent la préservation de l'espèce, par exemple la construction d'abris, de greniers ou qui codifient les rapports sociaux comme la parole politique chez Sophocle. Eschyle mentionne en outre la médecine, la diététique et la divination. Mais il n'y est pas vraiment question des machines de nos mécaniciens. A l'inverse, à peu près rien de toutes ces techniques, essentielles pour l'espèce humaine, ne figurent dans les traités de mécanique.
2. La description du contenu de la mécanique ancienne que nous pouvons tirer de notre corpus correspond assez bien avec ce que nous en disent les textes que j'ai qualifiés de réflexifs, du moins ceux qui émanent de mathématiciens, autrement dit Géminius et Pappus.

B. Les tentatives de classification

Pour cette étude, j'utiliserai essentiellement trois témoignages :

- Le préambule des *Μηχανικά* du corpus aristotélicien (847 a 12- 847 b 15);
- Des extraits de la classification dite de Géminius de Rhodes, connue grâce au premier Prologue du *Commentaire au Livre I des Éléments d'Euclide* par Proclus²³ et aux fragments rapportés à un certain²⁴ Anatolius et conservés dans l'ultime (et inauthentique) section (N°138) des

²² Cette démarche, on le sait, se retrouve dans l'ensemble des sciences et même plus généralement dans toutes les disciplines intellectuelles en Grèce ancienne. Il existe des *Éléments* d'éthique ou de "théologie" !

²³ Ed. Friedlein, p. 38, l. 2—p. 42, l.8.

²⁴ On possède toute une série de témoignages sur une ou plusieurs personnes appelées Anatolius dont il est difficile de dire s'il s'agit ou non d'une seul et même personnage, auquel cas il s'agirait d'un des maîtres de Jamblique, dédicataire d'une de ses traités, lui-même auteur d'un ouvrage d'arithmologie pythagoricienne en 10 livres, chef de l'école aristotélicienne d'Alexandrie et sénateur de cette ville, ultérieur élu évêque de Laodicée (V. [Goulet, 1989]). J'ajouterai un argument en faveur de l'identité d'auteur pour nos fragments et l'ouvrage d'arithmologie pythagoricienne. L'extrait N°6 est souvent passé sous silence car il paraît un peu étrange et déplacé. Heiberg le qualifie d'ailleurs de "unklare" et l'édite ainsi « Ὅτι ὁ κύκλος ἔχει στερεὰ μὲν ὀκτώ, ἐπίπεδα δὲ ἕξ, γωνίας δὲ δ », soit littéralement « Que le cercle a : huit solides; six plans; quatre angles ». A la suite de Th.-H. Martin (qui avait donné une explication de cette note dans [Martin, 1854], p. 433, n. 10), Heiberg corrige "στερεὰς" en "στερεὰ" : il a probablement tort. Le texte a sans doute été altéré par la (mauvaise) résolution d'une abréviation, et je crois qu'il faut

Definitiones attribuées à Héron d'Alexandrie²⁵.

- La préface du Livre VIII de la *Collection mathématique* de Pappus (début du IV^e s.), assez tardive mais, selon moi, fortement inspirée par Héron.

1. La classification de Géminus

Il est expédient de commencer par l'examen du texte chronologiquement intermédiaire. Géminus est en effet un stoïcien disciple de Posidonius, sans doute du premier siècle avant notre ère, auteur d'une encyclopédie mathématique en plusieurs livres malheureusement perdue, laquelle incluait une classification des sciences mathématiques. Le principe qui la gouverne est l'opposition entre les mathématiques qui traitent des intelligibles (arithmétique et géométrie) et celles qui traitent des choses sensibles (mécanique, astronomie, optique, géodésie, canonique et logistique). En fait les grandes lignes de cette classification ont été élaborées dans l'ancienne Académie, au cours de la seconde moitié du IV^e siècle avant notre ère, c'est-à-dire à l'époque d'Aristote, ce qui ne veut évidemment pas dire qu'il existait déjà, à cette époque, un ordonnancement aussi détaillé, au niveau des sous-espèces, que celui rapporté par Proclus²⁶.

Voyons le passage correspondant à la description de la mécanique :

« ... Après ces sciences vient celle que l'on appelle la mécanique, branche qui prend part à l'étude des choses sensibles et matérielles. D'elle dépend l'organopoeïque : la fabrication des instruments utiles à la guerre, tels que les engins construits par Archimède dont on dit qu'ils défendirent Syracuse contre ses assiégeants; et la thaumatopoeïque qui utilise habilement des moyens pneumatiques comme l'ont pratiqué Ctésibios et Héron, ou des poids dont le déséquilibre est la cause du mouvement, et l'équilibre, la cause de l'immobilité comme le *Timée* l'indique aussi, ou encore des cordes à boyaux et des cordes de sparte, imitant les gesticulations et les mouvements des êtres animés. De la mécanique dépend aussi la connaissance générale des équilibres et en particulier ce qu'on appelle les centres de gravité; puis la sphéropée, qui permet d'imiter les révolutions célestes, traitée elle aussi par Archimède, et, en général, toute la cinétique de la matière »²⁷.

lire : « Ὅτι ὁ κύβος ἔχει στερεὰς μὲν ὀκτώ, ἐπίπεδα δὲ ἕξ, γωνίας δὲ δ », soit « le cube a huit angles solides (féminin), six faces planes et quatre angles (s. ent. plans par face) ». Il ne s'agit donc pas de classification d'objets géométriques (comme dans le sauvetage ébouriffant de Martin), mais d'une considération arithmologique banale sur le fait que le cube est une "harmonie" (8, 6, 4). Il manque la mention des 12 arêtes pour faire bonne mesure. On trouve ce genre de remarques chez les auteurs néo-pythagoriciens, tout particulièrement dans les *Theologoumena arithmetica* attribuée (faussement) à Jamblique et qui contiennent plusieurs passages explicitement rapportés à Anatolius.

²⁵ V. ed. Heiberg, pp. 160, l. 8—p. 168, l. 12.

²⁶ Je me permets de renvoyer sur ce point à Vitrac, B., Les classifications des sciences mathématiques en Grèce ancienne, à paraître (Juin 2005) dans les *Archives de philosophie*.

²⁷ Ed. Friedlein, p. 41, l. 3-18 : « Πρὸς δὴ ταύταις ἡ μηχανικὴ καλουμένη τῆς περὶ τὰ αἰσθητὰ καὶ τὰ ἔνυλα πραγματείας μέρος ὑπάρχουσα, ὑπὸ δὲ ταύτην ἢ τε ὀργανοποικὴ τῶν κατὰ πόλεμον ἐπιτηδείων ὀργάνων, οἷα δὴ καὶ Ἀρχιμήδης λέγεται κατασκευάσαι τῶν πολεμούντων τὴν Συράκουσαν ἀμυντικὰ ὄργανα, καὶ ἡ θαυματοποικὴ τὰ μὲν διὰ πινῶν φιλοτεχνούσα, ὡσπερ καὶ Κτησίβιος καὶ Ἡρων πραγματεύονται, τὰ δὲ διὰ ῥοπῶν, ὧν τῆς μὲν κινήσεως τὴν ἀνισοροπίαν αἰτιατέον, τῆς δὲ στάσεως τὴν ἰσοροπίαν, ὡσπερ καὶ ὁ Τίμαιος διώρισεν, τὰ δὲ διὰ νεύρων καὶ σπάρτων ἐμφύχους ὀγκὰς καὶ κινήσεις ἀπομιμουμένων. ὑπὸ δὲ τὴν

Quelques remarques sur ce texte :

1. La mécanique est décrite comme une des sciences mathématiques qui portent sur les sensibles (τὰ αἰσθητὰ), et plus particulièrement les sensibles dotés de matière (τὰ ἔνυλα), trait différentiel que la mécanique partage évidemment avec l'astronomie.
2. La mécanique est la seule des six sciences pour laquelle Géménius ne désigne pas vraiment un objet spécifique. Corrélativement c'est aussi la seule pour laquelle il mentionne des auteurs : Archimède, Ctésibios, Héron²⁸, comme si la mécanique se définissait par les mécaniciens et la tradition. De fait nous verrons que le rôle d'Archimède dans la constitution de la mécanique est, pour nos auteurs, une question centrale.
3. Plutôt que de désigner un ou des objets, Géménius-Proclus énumèrent donc des sous-spécialités, et l'on retrouve partiellement ce que nous avons vu en discutant notre corpus : d'une part une série de τέχναι, on peut même dire de poïétiques, caractérisées par le type de machines qu'elles construisent et utilisent : organopoïétique (que d'autres appellent bélopoïétique, par exemple Philon), thaumatopoïétique (incluant la construction des automates et de certains instruments pneumatiques ou hydrauliques); sphéropoïa; d'autre part des fondements, comme la théorie des équilibres et celle des centres de gravité.
4. La progression globale de la présentation de Géménius pour les 6 espèces qui traitent des sensibles suit une implication physique croissante de l'objet dont elle traite. Mais, malgré cette implication physique, il est explicitement affirmé qu'il s'agit d'une science mathématique ce qui, comme nous allons le voir, est une inflexion assez nette par rapport à ce que le texte aristotélicien dit des questions de mécanique.
5. Les fragments d'Anatolius font très clairement référence au schéma classificatoire de Géménius quoique celui-ci ne soit pas nommé. Ainsi l'extrait N°3 pose la question « D'où la "μαθηματική" a-t-elle tiré son nom ? » et rapporte pour commencer ce qu'en disent les Péripatéticiens. Suit une seconde explication qui n'est autre qu'une généalogie totalement fictive du schéma classificatoire dit de Géménius²⁹ dont les huit branches principales sont énumérées dans l'extrait 5, tandis que le

μηχανικὴν ἔστιν καὶ ἡ τῶν ἰσορροπῶν ὅλως καὶ τῶν λεγομένων κεντροβαρικῶν διάγνωσις, καὶ ἡ σφαιροποιία κατὰ μίμησιν τῶν οὐρανίων περιφορῶν, οἷαν καὶ Ἀρχιμήδης ἐπραγματεύσατο, καὶ ὅλως πᾶσα ἢ τῆς ὕλης κινητικὴ ». Traduction française (légèrement modifiée) reprise à [Ver Eecke, 1948], p. 35.

²⁸ Un ajout de Proclus ? Cela dépend de la chronologie qu'on adopte pour Géménius et Héron. Avec les hypothèses chronologiques de O. Neugebauer, Géménius lui-même pouvait citer Héron. Il est également possible que Proclus soit responsable de la référence au *Timée* de Platon (ὡσπερ καὶ ὁ Τίμαιος διώρισεν).

²⁹ « Mais on dit que Pythagore et ses disciples ont appliqué spécialement ce nom de "mathématique" à la géométrie et à l'arithmétique seules. Car, autrefois, chacune de ces sciences portait un nom différent et n'avait pas de nom commun à l'une et l'autre. Ils les appelèrent donc ainsi parce qu'ils y trouvèrent le caractère scientifique approprié à l'enseignement ... Mais les auteurs récents ont donné une plus grande extension à ce mot, dans la pensée que le mathématicien devait s'occuper, non seulement de la matière incorporelle et idéale, mais encore de celle qui touche à la substance corporelle et sensible. En effet il doit être adroit dans la théorie du mouvement des astres...; de plus il doit savoir considérer les changements de la vue, et scruter les raisons pour lesquelles les objets ne paraissent pas, à toute distance, ce qu'ils sont, ... Ils pensaient, en outre, qu'un tel homme devait être mécanicien, expert en géodésie et logisticien, et qu'il devait, *a fortiori*, s'occuper des causes du mélange mélodieux des sons et de leur composition musicale; lesquels sont précisément corporels, ou, du moins, à l'extrême fin de ceux qui s'élèvent au-dessus de la matière sensible », *op. cit.*, p. 160, l. 24—p. 162, l. 4; l. 6-14; l. 20-25. Trad. M. Villerman-Lécolier, légèrement modifiée.

N°7 souligne les proximités qui existent entre certaines spécialités³⁰. Auparavant quelques exclusions supplémentaires avaient été prononcées à la fin de l'extrait 5 :

« ... Ni ce que l'on appelle tactique, ni l'architecture, ni la musique populaire, ni l'étude des phases des étoiles, ni même celle qui est homonyme à la mécanique proprement dite, ne sont, contrairement à ce que pensent certains, des parties de la mathématique, comme nous le démontrerons tout au long de notre exposé avec clarté et méthode »³¹.

Malheureusement nous ne possédons pas l'exposé détaillé promis. Ce témoignage confirme le statut controversé de la mécanique.

2. Le préambule des *Μηχανικά*

D'emblée l'auteur des *Μηχανικά* introduit une distinction cardinale de la philosophie naturelle d'Aristote entre ce qui agit "selon la nature" (κατὰ φύσιν) et ce qui agit "contre nature" (παρὰ φύσιν), distinction d'où dérive le recours à l'art (τέχνη) laquelle, au profit de l'humanité, agit contre nature (*art*- ificiellement) à l'aide d'un mécanisme, expédient ou artifice (μηχανή). Le texte oppose l'invariabilité de l'action de la nature et la variabilité de l'intérêt humain : on peut par exemple penser au comportement des corps graves lesquelles, par nature, se dirigent toujours vers le bas, alors que l'intérêt du bâtisseur pourra être de les contraindre à un mouvement vers le haut³². Après s'être référé au poète Antiphon³³, notre auteur propose une sorte de paradigme du problème mécanique et de la dimension apparemment aporétique qui est la sienne : « le plus petit l'emporte sur le plus grand » (τά τε ἐλάττονα κρατεῖ τῶν μειζόνων) par exemple « les choses qui, ayant une petite puissance, meuvent de très grands poids » (τά ῥοπήν ἔχοντα μικρὰν κινεῖ βάρη μεγάλα).

Le problème mécanique a donc ici une nette connotation d'artificialité, voire de merveilleux, qu'il conservera chez les auteurs postérieurs, notamment en ce qui concerne la tradition de la thaumatopoïétique. Cela dit, on ne doit pas surestimer ce caractère comme on l'a trop souvent fait. Précédant l'opposition polaire κατὰ φύσιν / παρὰ φύσιν, il y a l'étonnement :

Le texte ne prétend pas que les mathématiques "appliquées aux choses sensibles" n'existaient pas autrefois, car il se focalise sur la question du nom. Au départ — c'est-à-dire avant Pythagore ! — chaque spécialité avait son nom propre, sans qu'il y ait de nom commun. Le maître instaura une communauté entre arithmétique et géométrie — les mathématiques qui portent seulement sur les intelligibles selon Gémios — et ce pour des raisons éducatives. Puis on leur adjoignit les spécialités qui traitent des sensibles. C'est une généalogie des sciences mathématiques, parallèle à la procession néo-pythagoricienne qui s'oppose totalement à la version d'inspiration aristotélicienne que Proclus a conservée dans son célèbre Résumé de l'histoire de la géométrie (ed. Friedlein, p. 64, l. 7—p. 68, l. 6). Cf. [Vitrac, 1996], pp. 40-46.

³⁰ « Ce qui se rapproche le plus de l'arithmétique, ce sont la logistique et la canonique; car l'arithmétique, en puisant dans la quantité discrète, procède suivant des rapports et des proportions numériques. Ce qui se rapproche le plus de la géométrie, ce sont l'optique et la géodésie; et ce qui, au plus haut point, se rapproche de l'une et de l'autre, ce sont la mécanique et l'astronomie » *Ibid.* p. 164, l. 21—p. 166, l. 3.

³¹ *Op. cit.*, p. 164, l. 13-18.

³² Encore chez Héron et Pappus, l'utilisation des machines élévatrices constituent l'exemple privilégié de recours à des mouvements παρὰ φύσιν.

³³ « Par l'art nous l'emportons, là où, par nature, nous serions vaincus » (τέχνη γὰρ κρατοῦμεν, ὧν φύσει νικώμεθα).

"Θαυμάζεται" est le premier mot du traité ! Et on se rappelle que pour Aristote la curiosité et l'étonnement (τὸ θαυμάζειν) devant une difficulté (ἀπορία) sont les racines de la connaissance³⁴, bien davantage que le besoin (τὸ χρησιμὸν) et la nécessité (τὰ ἀναγκαῖα) sur lesquels Démocrite, par exemple, mettait l'accent. Selon Aristote les arts et les sciences sont apparues quand les besoins des hommes étaient satisfaits. Si certains problèmes mécaniques sont particulièrement étonnants, reste que la τέχνη énonce des règles qui permettent de comprendre et de reproduire les mêmes effets, règles susceptibles d'être enseignées — c'est ce qui distingue l'art de la simple expérience (ἐμπειρία) —, la science (ἐπιστήμη) produisant une explication causale par démonstration.

D'où la dimension mathématique de certains problèmes mécaniques reconnue dès ce texte d'inspiration aristotélicienne. Il me semble en effet que le préambule s'accorde assez bien avec la position du Stagirite lequel, rappelons-le, est le premier auteur conservé à mentionner la mécanique comme discipline constituée. Le contexte est celui de l'utilisation d'une démonstration propre à une science dans une *autre* science : ceci n'est possible qu'à l'intérieur d'une science *subordonnée* à une science elle-même dite *directrice ou hégémonique*. Dans les témoignages des *Seconds Analytiques*, il est précisé que la mécanique est subordonnée à la géométrie et même, plus précisément, à la stéréométrie. Ici, dans les *Μηχανικά*, la formulation est cependant légèrement différente :

« Et ces problèmes (les problèmes mécaniques) ne sont ni tout à fait les mêmes que les problèmes physiques, ni tout à fait à part d'eux, mais ils ont quelque chose en commun avec les spéculations mathématiques et celles de la physique; en effet, d'une part l'évidence est produite grâce aux mathématiques, d'autre part, ce à quoi cela s'applique, grâce à la physique »³⁵.

La divergence n'est peut-être pas si grande si l'on admet que, dans la mesure où la discussion des *Analytiques* porte sur la démonstration, le Stagirite peut mettre l'accent sur le seul aspect mathématique. Si l'on veut concilier les deux textes, on reformulera la position aristotélicienne en disant que la mécanique est subordonnée aux mathématiques et à la physique. On remarquera toutefois que la mécanique ne figure pas dans la liste des sciences les plus physiques des mathématiques (τὰ φυσικώτερα τῶν μαθημάτων) du Livre II de la *Physique*³⁶ et, compte-tenu de ce que nous venons de voir, il est peut-être imprudent de l'y ajouter, comme le fait Barnes³⁷, car l'artificialité semble constitutive de la mécanique pour Aristote comme pour l'auteur des *Μηχανικά*. Son inscription du côté du "παρὰ φύσιν" interdit sans doute qu'on la qualifie de "φυσικώτερον".

³⁴ Cf. *Met.* A, 1-2, en particulier 982 b17-18.

³⁵ 847 a 24-27 : ἔστι δὲ ταῦτα τοῖς φυσικοῖς προβλήμασιν οὔτε ταῦτὰ πάμπαν οὔτε κεχωρισμένα λίαν, ἀλλὰ κοινὰ τῶν τε μαθηματικῶν θεωρημάτων καὶ τῶν φυσικῶν· τὸ μὲν γὰρ ὡς διὰ τῶν μαθηματικῶν δῆλον, τὸ δὲ περὶ ὃ διὰ τῶν φυσικῶν.

³⁶ V. *Phys.*, B, 2, 194 a7-8.

³⁷ V. Aristotle, *Posterior Analytics*, translated with a commentary by J. Barnes, Oxford, Clarendon Aristotle Series, 1994, p. 159.

3. La préface du Livre VIII de la *Collection* de Pappus

C'est précisément ce point que le premier paragraphe de la préface de Pappus remet en cause sans hésitation :

« La théorie mécanique, mon fils Hermodore, étant utile aux choses multiples et importantes qui se présentent dans la vie, elle mérite à juste titre la plus grande faveur chez les philosophes, et fait l'ambition de tous les mathématiciens, parce qu'elle est pour ainsi dire la première qui s'applique aux recherches physiques sur la matière constituant les éléments du Monde. Considérant le repos, le transport des corps et leur mouvement selon le lieu dans l'Univers, cette théorie, organisée au moyen de théorèmes dominés par la matière elle-même, fournit la raison des corps qui se meuvent de par nature, et elle en force d'autres, en des mouvements contraires, à se déplacer contre nature hors des lieux qui leur sont propres »³⁸.

Il y est donc question de *théorie* mécanique (μηχανική θεωρία); elle mérite la faveur des philosophes pour sa contribution à la "physique" (φυσιολογία); elle rend compte (αἰτιολογεῖ) du repos et des mouvements des corps dans l'univers, qu'ils soient selon la nature (κατὰ φύσιν) et le lieu naturel ou contraire (παρὰ φύσιν ἔξω τῶν οἰκείων τόπων). Voilà la physique générale devenue une province de la mécanique ! Rien d'étonnant donc à ce qu'il enchaîne avec la mention de l'opinion soutenue par les mécaniciens de l'école héronienne :

« Les mécaniciens partisans d'Héron disent qu'une partie de la mécanique est rationnelle, l'autre partie appliquée et que la partie rationnelle se compose de la géométrie, de l'arithmétique, de l'astronomie et des études physiques; tandis que la partie appliquée comprend l'art de travailler l'airain, l'art de bâtir, l'art de construire en bois, l'art de la peinture et l'exercice manuel de ces arts »³⁹.

La description diverge sur un point essentiel avec le point de vue de Géminus tel que nous l'avons rencontré dans la classification : l'école héronienne fait de la mécanique la science *architectonique* par excellence, dont la partie rationnelle (τὸ λογικόν) n'est constituée de rien moins que des sciences mathématiques les plus prestigieuses et des discours physiques. Quant à la partie appliquée (τὸ χειρουργικόν), elle suppose la maîtrise de toute une série de τέχναι !

Il me semble donc que l'affirmation de P. Tannery selon laquelle la présentation de Pappus, ici, est la même que celle de Géminus⁴⁰ est un peu rapide. On peut y distinguer au moins trois opinions :

- (i) celle de Pappus, dans le paragraphe dédicatoire, dont je viens de souligner le caractère programmatique et polémique;
- (ii) celle de l'École de Héron, en un sens assez extraordinaire et rapportée à la suite⁴¹;

³⁸ Ed. Hultsch, p. 1022, l. 3-13. Traduction française reprise à [Ver Eecke, 1982], pp. 809-810.

³⁹ Ed. Hultsch, p. 1022, l. 13—p. 1024, l. 2. Traduction française reprise à [Ver Eecke, 1982], p. 810.

⁴⁰ V. [Tannery, 1887]. Réimp. Sceaux, J. Gabay, 1988, pp. 62-63.

⁴¹ Il est vraisemblable que Pappus s'inspire ici de la très probable préface que devait comporter le Livre I des *Mécaniques*, malheureusement acéphale dans l'état où il nous a été transmis. V. *supra*, n. 12 et *infra*, III.

(iii) enfin les diverses définitions de la mécanique proposées par les Anciens⁴².

En fait, comme je l'ai souligné pour Géminius, il s'agit de définir ceux que l'on appelle "mécaniciens" ! En ce qui concerne ce paragraphe, la comparaison des textes quant au vocabulaire utilisé, la mention de quatre mêmes sous-espèces, la référence commune à Archimède⁴³, à l'imitation des vivants ... ne laisse aucun doute sur la parenté Pappus—Géminius⁴⁴ que Tannery étendait à l'ensemble du texte. On relèvera cependant une autre divergence entre les deux auteurs, celle-ci sans doute moins conceptuelle qu'historique : l'insertion d'une cinquième branche de la mécanique, mais en première position⁴⁵, à savoir l'art des "artefacteurs" (constructeurs de machines de levages), spécialité qui s'était sans doute développée durant l'époque qui sépare Géminius de Pappus. Elle apparaît très clairement dans le chapitre X du *De architectura* de Vitruve, dans les *Mécaniques* de Héron et dans la suite du Livre VIII de la *Collection* qui en procède.

Comme je l'ai déjà dit, la préface de Pappus au Livre VIII ne se contente pas de ces considérations classificatoires, plus ou moins reprises à Géminius et à Héron. La suite montre clairement la connexion qu'il y a entre deux problèmes : d'une part les relations entre les différentes spécialités de la classification, tout particulièrement le lien géométrie—mécanique et, plus généralement, le rôle instrumental que peuvent tenir les mathématiques "intelligibles" (pour garder la terminologie de Géminius) dans les sciences "mixtes" et d'autre part la place qu'il faut accorder à Archimède dans l'histoire de la mécanique⁴⁶.

C. L'"histoire" de la mécanique selon Plutarque

La question est manifestement plus ancienne que Pappus. A le lire, on peut même croire qu'une controverse avait opposé Géminius et le mécanicien Carpos d'Antioche, sans doute un auteur du premier siècle de notre ère, peut-être un contemporain de Héron. Cela n'aurait rien d'étonnant car c'est dans cette période — en fait du II^e siècle avant au II^e siècle après notre ère⁴⁷ —, que s'est constituée une première élaboration de la légende d'Archimède. La réputation de

⁴² Ed. Hultsch, p. 1024, l. 12—p. 1026, l. 4. Traduction française in [Ver Eecke, 1982], pp. 810-812.

⁴³ En revanche celle à Ctésibios (chez Géminius) a disparu. Manifestement le corpus héronien (*Pneumatiques, Automates, Équilibres, Clepsydres hydrauliques, Baroukos, Mécaniques* ...) est devenu la *référence* à consulter pour Pappus en matière de mécanique.

⁴⁴ A moins de supposer que Pappus ne continue de suivre Héron, lequel rappelait lui-même la position de ses prédécesseurs dont Géminius. Cf. *supra*, n. 28. Une confirmation de ce que celui-ci est l'une des sources principales de Pappus pourrait se trouver au début de l'argument suivant, quand ce dernier va discuter le « cas Archimède » (Ed. Hultsch, p. 1026, l. 5-9) : le stoïcien est nommément cité, ainsi que le titre de son ouvrage (περὶ τῆς τῶν μαθημάτων τάξεως). Il fait donc partie des sources de Pappus, même si c'est de manière indirecte, par l'intermédiaire de Carpos d'Antioche.

⁴⁵ Ed. Hultsch, p. 1024, l. 14-17.

⁴⁶ V. Ed. Hultsch, p. 1026, l. 5—p. 1028, l. 3. Traduction française in [Ver Eecke, 1982], pp. 813-814.

⁴⁷ Sous le stylet de l'historien grec Polybe (vers 200-120), relayé par Cicéron (106-43), Diodore de Sicile, Vitruve (I^{er} s^a.), Tite-Live (59^a-17^p), Ovide (43^a-17^p), Valère Maxime (I^{er} s^p.), Silius Italicus (26-101), Plutarque de Chéronée, Lucien de Samosate (120-180), Galien, pour ne citer que les témoignages les plus anciens.

celui-ci était immense dans l'Antiquité (tous les auteurs s'accordent sur ce point !), mais on peut penser qu'elle tenait, du moins aux yeux des non-mathématiciens, certainement plus à ses réalisations mécaniques, réelles ou supposées, au rôle qui avait pu être le sien dans la défense de Syracuse, qu'aux subtilités d'un traité comme celui des *Spirales*. Sa "biographie", fortement romancée, s'articule en effet autour de cinq épisodes : (i) l'anecdote de la couronne du roi Hiéron et d'« Archimède au bain » (Vitruve); (ii) celle du halage d'un navire (Silius Italicus, Plutarque, Proclus); (iii) la construction d'un "planétarium" (Cicéron, Ovide, Lactance, Claudien, Martianus Capella); (iv) sa participation au siège de Syracuse (Polybe, Tite-Live, Plutarque); (v) son meurtre perpétré par les Romains, malgré les injonctions de Marcellus (Cicéron, Valère Maxime, Plutarque). Les quatre premiers apparaissent comme des « mises en scène » sans doute élaborés à partir des contributions mécaniques du Syracusain⁴⁸. Ce n'est que dans certaines versions du récit de sa mort que la géométrie est évoquée, mais précisément les (quatre) différentes versions qu'on en connaît divergent !

Certains auteurs ne partagent cependant pas cet engouement pour les réalisations techniques d'Archimède. C'est le cas du célèbre prosateur Plutarque de Chéronée (v. 46-120). Celui-ci, à sa manière — l'approche "historique" ou "biographique" —, nous dit quelque chose du statut ambigu de la mécanique en retraçant deux moments clés de l'"histoire" de cette discipline, autour de deux héros ou plutôt un anti-héros et un héros : le πρῶτος εὐρετής Archytas de Tarente et Archimède.

La topique du "premier inventeur" est bien connue en Grèce ancienne et est particulièrement bien illustrée par l'histoire des sciences telle que la conçoivent les Anciens. Pour les sciences qui constitueront le quadrivium, Pythagore, mais aussi Thalès ou Anaximandre, sont les candidats les plus "sérieux", et il va de soi que ceci en fait des personnages dignes de l'éternelle admiration des hommes. Dans le cas de la mécanique, les choses sont différentes, et ce de deux manières :

- d'un côté, si l'on suit Plutarque, sa naissance est entachée de "scandale" et son ou ses fondateurs mérite(nt) le blâme.
- Mais, d'un autre côté, du strict point de vue chronologique, le récit n'est pas sans vraisemblance.

En effet, malgré le rôle que lui fait jouer Plutarque, les dialogues de Platon ne contiennent aucune indication sur la mécanique en tant que *science mathématique* ; cependant celle-ci semble bien connue d'Aristote, au plus tard vers 330 avant notre ère. Son développement — sinon son origine — est donc vraisemblablement à rattacher aux savants de la première moitié du IV^e siècle. La tradition rapporte également l'invention de nouvelles machines de jets (catapultes) aux toutes premières années de ce siècle, dans le milieu des "ingénieurs" de Denys l'Ancien à Syracuse.

⁴⁸ Outre des connaissances scientifiques les épisodes (i-iii) supposent une réelle ingéniosité technique. Mais c'est encore plus vrai des machines de guerre et des dispositifs de défense qu'il est censé avoir développés avant et pendant le siège de Syracuse — ou des inventions plus "civiles" qu'on lui attribue : le limaçon ou vis d'Archimède, selon Diodore de Sicile et Athénée; la vis selon Athénée et Pappus; le moufle selon Galien et Oribase, et même l'orgue hydraulique, si l'on en croit Tertullien.

Pour ce qui concerne la mécanique mathématique nous possédons trois versions du mythe de fondation. Deux sont le fait de Plutarque, le premier inséré dans l'aparté sur Archimède, lui-même inclus dans le récit de la prise de Syracuse par Marcellus⁴⁹, le second dans les *Propos de table*⁵⁰. L'un et l'autre mentionnent le célèbre Archytas de Tarente, ami supposé et correspondant de Platon, comme premier inventeur, mais en l'associant avec Eudoxe dans la *Vie de Marcellus*, avec Eudoxe et Ménechme, dans les *Propos*. La troisième version est beaucoup plus courte et tout à fait neutre. On la trouve dans la notice que Diogène Laërce consacre à Archytas :

« Celui-ci (Archytas) fut le premier à faire usage avec méthode des principes mathématiques pour les problèmes mécaniques et, le premier, il introduisit en outre un mouvement instrumental dans une configuration géométrique, dans ses recherches sur la duplication du cube, par le fait de prendre deux moyennes proportionnelles grâce à la section d'un demi-cylindre. Et en géométrie, il fut le premier à trouver le cube, comme le dit Platon dans la *République* »⁵¹.

Plutarque et Diogène suivent probablement des sources divergentes. Celle de Diogène pourrait être Aristoxène de Tarente. Quant à celle que suit Plutarque, elle est facile à identifier : Platon, Archytas, Eudoxe et Ménechme sont associés dans la célèbre épigramme d'Ératosthène⁵² consacrée au problème de la duplication du cube. Malgré sa concision, la version de Diogène prétend transmettre trois informations au sujet des travaux d'Archytas :

- (i) Il aurait été le premier à introduire les principes mathématiques en mécanique, en bref, il serait le père-fondateur de la mécanique mathématique.
- (ii) Archytas aurait résolu le problème de l'insertion des deux moyennes entre deux droites données, problème qui généralisait celui très célèbre de la duplication du cube, associé, depuis Ératosthène au moins, à la tradition platonicienne.
- (iii) En faisant allusion à la géométrie du cube et à la *République* de Platon, Diogène suggère qu'il était aussi l'un des premiers savants à se consacrer à la stéréométrie⁵³.

Une dernière particularité mérite d'être relevée dans le texte de Diogène : il suggère que la solution proposée par Archytas pour le problème de l'insertion des deux moyennes était

⁴⁹ *Vie de Marcellus*, 14. 7—19. 12.

⁵⁰ Livre VIII, Question 2 : « Πῶς Πλάτων ἔλεγε τὸν θεὸν ἀεὶ γεωμετρεῖν » (En quel sens Platon a dit que le Dieu ne cesse de faire la géométrie ?). L'extrait (718 E 7-F4) fait partie de la tirade de Tyndare.

⁵¹ Livre VIII, § 83 : « Οὗτος πρῶτος τὰ μηχανικὰ ταῖς μαθηματικαῖς προσχρησάμενος ἀρχαῖς μεθώδευσε καὶ πρῶτος κίνησιν ὀργανικὴν διαγράμματι γεωμετρικῷ προσήγαγε, διὰ τῆς τομῆς τοῦ ἡμικυλίου δύο μέσας. ἀνὰ λόγον λαβεῖν ζητῶν εἰς τὸν τοῦ κύβου διπλασιασμόν. κὰν γεωμετρία πρῶτος κύβον εὔρειν, ὡς φησι Πλάτων ἐν Πολιτείᾳ ». On peut remarquer que la biographie d'Eudoxe par le même auteur, à l'inverse, ne mentionne rien au sujet de la mécanique. Mais elle en fait un disciple d'Archytas (*Ibid.*, VIII, § 86) et ce, en s'appuyant sur les *Pinakes* de Callimaque.

⁵² Il est transmis par Eutocius. V. comm. in *SC* II. 1, ed. Heiberg, p. 96, l. 10-27.

⁵³ Le célèbre Tarentin n'est pas cité dans le dialogue, mais au Livre VII, lorsqu'il présente les sciences mathématiques, Socrate fait une critique sévère des spécialistes de stéréométrie, au demeurant embryonnaire et désignée comme « la science qui porte sur la dimension des cubes, c'est-à-dire ce qui participe de la profondeur » (528 b3). Dès l'Antiquité, on a cherché à identifier la cible des allusions platoniciennes; le témoignage de Diogène suggère que certains ont pensé à Archytas; cf. [Euclide/Vitrac, 2001], p. 101, en particulier n. 26.

instrumentale (ὄργανική). Or nous possédons un précieux témoignage à propos de cette solution, transmis par Eutocius qui dit suivre le célèbre historien péripatéticien Eudème de Rhodes⁵⁴. Le Tarentin introduit une courbe — produite comme intersection d'un demi-cylindre et d'un demi-tore (lui-même engendré par la rotation d'un demi-cercle perpendiculaire au plan de base du demi-cylindre) —, qu'il coupe ensuite grâce à la surface d'un cône (lui-même engendré par la rotation d'un triangle rectangle). Il s'agit donc d'une très élégante solution stéréométrique qui ne paraît pas mériter la qualification d'"instrumentale", quelque peu infamante dans ce contexte.

Plusieurs explications sont possibles :

(i) Soit il y a confusion avec des solutions ultérieures, par exemple celles d'Ératosthène ou de Héron.

(ii) Soit il s'agit d'une information complémentaire : après sa solution géométrique Archytas aurait indiqué un moyen effectif de prendre les deux moyennes en recourant à un dispositif mécanique du genre du mésolabe.

(iii) Soit nous nous trompons sur le sens de ladite qualification, et "instrumentale" renvoie ici au fait que deux des trois solides sont engendrés par le mouvement de révolution d'une figure plane. Remarquons au passage qu'Euclide lui-même ne procède pas autrement pour définir sphères, cônes et cylindres dans le Livre XI de ses *Éléments*.⁵⁵

(iv) Enfin il se peut qu'Eudème ait complètement réécrit la preuve d'Archytas pour en faire disparaître le recours à certains instruments⁵⁶.

De son côté Plutarque affirme :

« Tel est le problème des deux moyennes proportionnelles. Comme c'est le principe nécessaire pour tracer beaucoup de figures, tous les deux < Eudoxe et Archytas > l'appliquèrent à des instruments appelés mésographes, ajustés d'après des lignes courbes et des sections (coniques ?) »⁵⁷.

Comme l'explication (ii), une telle assertion est en complète contradiction avec l'épigramme déjà citée d'Ératosthène. Ce dernier insiste précisément sur l'incapacité des trois auteurs susmentionnés à produire un instrument permettant la solution effective du problème, au contraire du mésolabe qu'il a lui-même construit. Surtout Plutarque insiste sur la réprobation qu'une telle

⁵⁴ *Ibid.*, p. 84, l. 12—p. 88, l. 2.

⁵⁵ Df. XI. 14, 18, 21. V. [Euclide/Vitrac, 2001], pp. 87-88. Dans le même ordre d'idées Pappus (Ed. Hultsch, p. 254, l. 24) rapporte une critique de Sporus de Nicée visant la génération de la quadratrice qualifiée de « trop mécanique en quelque sorte » (μηχανικωτέραν πως) quoiqu'aucun mécanisme, au sens physique du terme, n'apparaisse explicitement dans cette génération. Ce qui est en cause c'est l'effectivité d'une construction qui requiert, elle aussi, deux mouvements (géométriques). Plutarque (*Propos ...*, VIII, 2, 718 E) affirme que Platon critiquait Eudoxe, Archytas et Ménechme (dans cet ordre), pour leur recours à des constructions instrumentales et mécaniques (ὄργανικὰς καὶ μηχανικὰς κατασκευὰς).

⁵⁶ Le texte transmis par Eutocius n'est pas en dorien (dialecte utilisé par Archytas). Plusieurs formulations, notamment celles portant sur des proportions, suggèrent qu'il y a eu "modernisation", mais il n'est pas possible d'en circonscrire l'ampleur.

⁵⁷ *Vie de Marcellus*, 14. 10 : « ὡς τὸ περὶ δύο μέσας ἀνὰ λόγον πρόβλημα καὶ στοιχείον ἐπὶ πολλὰ τῶν γραφομένων ἀναγκαῖον εἰς ὄργανικὰς ἐξήγον ἀμφότεροι κατασκευὰς. μεσογράφους τινὰς ἀπὸ καμπύλων γραμμ[ατ]ῶν καὶ τμημάτων μεθαρμόζοντες »; trad. [Flacelière et Chambry, 1966], pp. 208-209.

solution suscita chez Platon⁵⁸ et fournit, au passage, un mythe d'origine de la mécanique considérée comme partie de l'art militaire, déchu, séparée de la géométrie (!) et méprisée des philosophes :

« La mécanique déchu fut ainsi séparée de la géométrie et, longtemps méprisée par la philosophie, elle devint une branche de l'art militaire »⁵⁹.

C'est manifestement en complète opposition avec ce point de vue que se situent des auteurs comme Carpos d'Antioche (et sans doute déjà Géminus), Pappus, mais aussi Héron, comme on le voit dans les préfaces de ses différents ouvrages, et dans cette idée assez étonnante que la mécanique est la science architectonique par excellence. L'embellissement que la géométrie est censée retirer de ses applications selon Carpos et Pappus est l'exacte contre-partie de la déchéance que dénonçait Plutarque :

« Mais Carpos et d'autres encore ont tiré parti de la géométrie d'une manière rationnelle au profit de certains arts; car la géométrie ne déchoit nullement lorsque, s'appliquant à nombre d'arts, elle tend à les corroborer; [la géométrie étant pour ainsi dire la mère des arts ne déchoit pas en s'appliquant aux machines et à l'architecture; car elle ne subit aucun dommage dans ses rapports avec la géodésie, la gnomonique, la mécanique et la scénographie] mais elle semble, au contraire, promouvoir ces arts et en être ainsi honorée et embellie comme il sied »⁶⁰.

Pour en revenir à Archimède, nos deux auteurs divergent également sur le point de savoir ce que le Syracusain avait confié à l'écriture à propos de mécanique : rien, selon Plutarque⁶¹. Les deux auteurs (pour Carpos nous sommes obligés de nous reporter à ce qu'en dit Pappus) sont apparemment d'accord pour reconnaître l'excellence d'Archimède en géométrie. Mais Plutarque s'efforce d'établir qu'une telle excellence est incompatible avec les préoccupations basement matérielles qui doivent animer un auteur de traités mécaniques. Carpos, de son côté, reconnaît du moins qu'Archimède n'a écrit qu'un seul traité mécanique, celui de la sphéropée. Malgré cette concession⁶², il est clair qu'il ne partage pas « les mêmes valeurs » que Plutarque, ni la même opinion quant au statut de la mécanique.

Même si nous ne pouvons rien dire sur ce qu'en pensaient les auteurs les plus anciens : Archytas, Euclide (?), Archimède, les textes que nous avons confrontés ne laissent guère de doutes sur le fait qu'il y ait eu controverse sur la définition et le statut de la mécanique, sur la délimitation de son domaine, sur les relations qu'elle entretient, ou devrait entretenir, avec les

⁵⁸ *Vie de Marcellus*, 14. 11; *Propos*, 718 E 7-F1. Cf. *supra*, la fin de la n. 53.

⁵⁹ *Vie de Marcellus*, 14. 11 : « οὕτω διεκρίθη γεωμετρίας ἐκπεσοῦσα μηχανική, καὶ περιορωμένη πρὸν χρόνον ὑπὸ φιλοσοφίας, μία τῶν στρατιωτικῶν τεχνῶν ἐγεγόνει »; trad. [Flacelière et Chambry, 1966], p. 209. Cette généalogie fantaisiste peut être rapprochée du récit global que nous avons évoqué *supra* (n. 29) à propos du Fragment N°3 d'Anatolius.

⁶⁰ Ed. Hultsch, p. 1026, l. 20—p. 1028, l. 3. Trad. P. Ver Eecke, p. 814.

⁶¹ *Vie de Marcellus*, 17. 5.

⁶² Quoi qu'il en soit, Vitruve inclut Archimède dans la liste des auteurs ayant écrit sur les machines. *De archit.*, VII, préface. Cf. aussi *supra* n. 48.

techniques ou avec d'autres spécialités, comme la géométrie et la philosophie⁶³. A une extrémité du spectre, Plutarque s'exprime comme si la mécanique se réduisait à la construction (empirique et dégradante) des machines de guerre, séparée de la géométrie, ce que justifie d'ailleurs son récit étiologique (« la mécanique devint une branche de l'art militaire ») si peu vraisemblable. A l'autre extrémité, Héron et sa conception architectonique de la mécanique dont les mathématiques pures deviennent l'une des branches. Sans doute, entre ces deux extrêmes, des positions intermédiaires, celles de Vitruve par exemple, et sans doute celle de Carpos d'Antioche, lesquels — comme Plutarque — mettent l'accent sur l'aspect poïétique — la mécanique est un ensemble de X-poïétique (X = organo-, thaumato-; bélo-...) —, mais qui ne la limitent pas aux seules machines de guerre et qui ne la séparent pas de la géométrie, bien au contraire. En outre, dès les *Mechanika* du corpus aristotélicien, plus encore dans celles de Héron et chez Pappus, le problème mécanique réclame une explication causale — ce qui nous entraîne du côté de la philosophie naturelle —, et, dans certains cas, une solution partiellement mathématisée.

Le phénomène d'interaction disciplinaire n'est pas propre à la mécanique; il semble même valoir pour toutes les sciences de la classification de Géminus qui traitent des sensibles⁶⁴. En particulier un débat quelque peu similaire a existé pour l'astronomie : quel est son objet ? Quelles sont ses méthodes ? Comment s'articule t-elle avec l'observation, avec la physique générale, et les mathématiques au sens strict (arithmétique et géométrie) ?... On en retrouve l'écho déjà chez Aristote puis chez ses commentateurs dans les discussions autour du programme *Sauver les phénomènes*, promises à un grand avenir. Mais la controverse n'est pas allée jusqu'à justifier un mythe d'origine marqué du sceau d'une infamie originelle.

Je ne connais pas non plus, pour l'astronomie, l'équivalent de la discussion autour des œuvres mécaniques d'Archimède. Au contraire la tradition ancienne souligne le mérite des premiers astronomes. Quand il y a controverse historique, il s'agit d'une querelle de priorité : qui a, le premier, dit que le cosmos était sphérique, qui a découvert l'inclinaison de l'écliptique... ? N'oublions pas non plus que, même s'il n'approuve pas l'approche (phénoménale) des astronomes contemporains, Platon, dans le Livre VII de la *République*, admet que les astres et la voûte céleste visible constituent le plus bel ornement du cosmos; que de l'*Épinomis* à la préface de l'*Almageste* perdure et même se développe l'idée que l'étude de l'astronomie est l'étude de la part divine de l'univers. L'excellence de l'objet, ou des objets, de l'astronomie compense largement son implication sensible, même pour des platoniciens quelque peu sectaires (à supposer qu'ils existent). L'objet de la mécanique ne peut rivaliser sur ce terrain, surtout lorsqu'on le limite, comme Plutarque, aux machines de guerre.

Dissipons une ambiguïté. Plutarque ne réproouve certainement pas la fabrication des machines de guerre à cause de leur pouvoir de destruction. L'admiration qu'il porte aux grands

⁶³ Cf. aussi l'extrait N°5 d'Anatolius cité *supra* (n. 31).

⁶⁴ En lisant la préface de la *Géographie* de Ptolémée, préface qui vise à la distinguer de la *Chorographie* et à souligner ses liens étroits avec les mathématiques, on voit que le débat n'a vraisemblablement pas non plus épargné la géographie (absente de la classification de Géminus).

chefs militaires atteste que son point de vue n'est pas celui d'un pacifiste moderne. En revanche il réproouve certainement l'évolution que ces machines introduisent dans l'art de la guerre et surtout la corruption de l'excellence militaire, le courage comme vertu individuelle, qu'elles ne manqueront pas de provoquer. Il fait le rapprochement entre construction de machines et l'activité manuelle et artisanale, en ce qu'elle a, selon lui, de dégradante. Et les Modernes ont été prompts à rapprocher le mépris des techniques, prôné par les Anciens — par certains Anciens — de l'existence de l'esclavage et de l'organisation des modes de production⁶⁵. Mais, du moins quant à Plutarque, il ne s'agit pas de machinisme productif, mais guerrier. Le contexte de son récit — le siège et la prise de Syracuse — s'y prête. Avec les machines de jets, l'excellence militaire ne sera plus la vertu des combattants et des stratèges; une part importante du mérite reviendra aux ingénieurs qu'il assimile aux artisans.

Quoi qu'il en soit, on ne peut certainement pas décrire le statut de la mécanique d'une manière unilatérale, à l'aide des seuls textes de Plutarque, comme on l'a trop souvent fait⁶⁶. Nos textes montrent également que les mathématiciens, en particulier Héron et Pappus, ne partagent pas le point de vue exprimé par Plutarque, qu'ils n'hésitent pas à soutenir la polémique, y compris en adoptant des positions assez extrêmes. Comme leurs adversaires ils utilisent la rhétorique : je pense à la préface de Pappus et surtout à celle — particulièrement ironique — des *Belopoiéka* de Héron. Ils ont aussi une arme peut-être plus efficace à long terme. Comme dans le cas de l'astronomie, ils peuvent tirer la mécanique "vers le haut", du côté des intelligibles, en tentant sa mathématisation. C'est ce dont je voudrais parler maintenant.

II. La mathématisation partielle de la mécanique et ses limites

Commençons par un truisme : il ne s'agit évidemment pas de formuler, puis d'appliquer des lois naturelles décrivant les phénomènes à l'aide d'équations, algébriques ou différentielles. Ni Archimède ni Héron n'avaient les moyens d'anticiper sur Newton ou Lagrange. Mais le recours à la géométrie constitue indiscutablement une forme de rationalisation, que l'on trouve aussi bien au niveau des explications causales que dans les constructions.

Ainsi, par exemple, dans la décomposition des machines en éléments simples, les mathématiques permettent de faire un pas de plus dans l'abstraction : le paradoxe apparent qu'est la puissance du levier est rapporté aux caractéristiques exceptionnelles de la figure géométrique par excellence qu'est le cercle⁶⁷. Mais d'autres figures géométriques interviennent aussi comme le triangle rectangle : il permet la construction de la vis⁶⁸; il montre comment celle-ci s'assimile à

⁶⁵ La littérature sur le sujet est immense. V. la discussion très éclairante (et de nombreuses références) dans [Gilles, 1980], pp. 170-195.

⁶⁶ A titre d'exemples de travaux par ailleurs très intéressants, v. [Vernant, 1965], pp. 56-57 et [Finley, 1984], pp. 240-241.

⁶⁷ V. Ps.-Arstt, *Problèmes mécaniques*, 847 b 16—848 a 38; Héron, *Méc.*, L. I, §§ 2—7. V. aussi *infra*, III.

⁶⁸ V. Héron, *Méc.*, L. II, § 5.

un coin enroulé. Combiné avec la théorie des proportions, il permet même de montrer que c'est fondamentalement pour la même raison qu'un coin plus aigu pénétre un corps plus aisément et qu'il est plus facile d'utiliser une vis dont le pas est court plutôt que long⁶⁹.

Quant aux constructions, elles sont standardisées selon un modèle musical dit du "ton" : les dimensions de toutes les parties d'un Tout — des machines comme des bâtiments — sont données en fonction d'un module et il suffit de fixer les dimensions de celui-ci (assimilé par nos auteurs à l'"élément" de la gamme musicale) pour toutes les déterminer. C'est ce que les Anciens appellent la *συμμετρία* des parties et du Tout. Dans le cas des machines de guerre nous trouvons chez Philon des tables qui permettent d'adapter les dimensions effectives du module (et donc de la machine) au poids des projectiles utilisés et à la portée que l'on souhaite donner à l'engin.

Compte tenu des ouvrages perdus ou altérés, il n'est guère possible d'évaluer la place que tenaient les mathématiques dans la *Syntaxe* de Philon, ni de faire des comparaisons avec Héron. Mais on sait toutefois que l'un et l'autre, en bons "disciples" d'Archytas, avaient proposé des solutions au problème des deux moyennes (proportionnelles), dont la solution effective est requise pour la pratique des constructions à échelles, réduite ou augmentée⁷⁰. Pappus, à son tour, proposera une solution au célèbre problème, qui n'a donc pas manqué de solliciter l'attention de nos mathématiciens-mécaniciens. Maîtriser cette question est aussi, pour eux, une façon de montrer qu'ils dominent des problèmes géométriques non élémentaires, au sens euclidien du terme. Tous l'envisageaient manifestement comme une sorte de préalable mathématique fondamental et l'on pourrait dire, non sans ironie, qu'ils plaçaient, comme Plutarque, le problème des deux moyennes au début de la mécanique !

Dans ces conditions il est un peu absurde de reprocher à Héron son manque d'originalité quant au contenu. Dans les *Mécaniques*, il ne formule d'ailleurs aucune revendication de ce genre⁷¹. Comme dans le cas d'Euclide avec ses *Éléments*, la pertinence de ses œuvres est ailleurs. Leur indéniable succès tient à d'autres causes, entre autres, dans le cas de Héron, au déploiement indiscutable d'un discours technologique dans lequel les mathématiques tiennent une place importante. C'est particulièrement le cas de disciplines ou de théories bien éprouvées, comme la géométrie ou la théorie des proportions. Celle-ci est omniprésente en statique, dans l'analyse des balances, la théorie archimédienne des centres de gravité, mais aussi dans l'analyse des problèmes d'engrenages. Même si ces idées n'ont absolument rien d'originales à l'époque de Héron, son œuvre montre qu'une telle démarche est poursuivie, certes avec des limites, mais consciemment et avec méthode. Ainsi la réduction en éléments est explicitement revendiquée dans la préface des *Pneumatiques*, §2.

⁶⁹ *Ibid.*, § 17.

⁷⁰ La solution de Philon est mentionnée par Pappus (*Coll.*, L. III, § VII), qui la rapporte à un traité intitulé *Mécaniques*. Elle est exposée en détails par Eutocius, mais sans mention d'ouvrages. C'est grâce à Philon lui-même, dans son traité des *Machines de guerres* (v. ed. Marsden, p. 116, l. 56. 7-8) que nous apprenons qu'il en avait traité dans son livre d'*Introduction*.

⁷¹ Cf., à l'inverse, les préfaces des *Pneumatiques*, § 1 ou celle du L. I des *Métriques*, *infra*, Partie III.

On peut montrer que cette méthode "analytique" a aussi commandé, de manière implicite, la structure d'une grande partie du traité de la *Dioptré*. Ainsi, avant la Proposition 12, Héron a pris soin d'insérer les opérations élémentaires nécessaires : détermination de la différence d'élévation de deux points situés d'un même côté (Prop. 6); détermination de l'éloignement horizontal de deux points (Prop. 10), elle-même obtenue comme résultat d'une sorte de chaîne déductive (Prop. 7-8 avec distinction de cas de figures dans la Prop. 8 !), certes un peu triviale mais que rien n'impose *a priori*, si l'on considère qu'il s'agit *seulement* d'un traité d'arpentage. En fait l'idéal déductif de la science "hégémonique" correspondante s'impose également dans cette application que constitue la géodésie⁷².

Une comparaison avec le *De architectura* de Vitruve fournit une sorte de contre-épreuve. Comme Héron, l'auteur romain a une conception architectonique de sa spécialité. Il nous explique que l'architecture est double, pratique et théorique et qu'elle comprend trois parties : la construction, la gnomonique et la *mécanique*. Il souligne également tout ce que l'architecte doit connaître des autres sciences pour être bien formé, sciences dont il fournit une énumération raisonnée⁷³, dans l'ordre : géométrie, optique, arithmétique, histoire, philosophie, musique, médecine, jurisprudence et astrologie, énumération qui, par son caractère encyclopédique, n'est pas sans rappeler la classification de Géminus, même si elle ne coïncide pas avec elle. Cela dit, la perspective du Romain est fondamentalement utilitaire et l'intervention des mathématiques dans le *De architectura* est très limitée. C'est seulement dans la préface du Livre IX (§§ 4—14) que Vitruve présente quatre exemples d'inventions mathématiques, selon lui parmi les plus utiles à la vie humaine et qui méritent donc notre admiration. Il s'agit : de la duplication du carré, attribuée à Platon; de l'"équerre" de Pythagore (fondée sur le triplet [3, 4, 5]), utile pour la conception des escaliers; de la notion de densité spécifique découverte par Archimède et présentée par Vitruve dans le cadre de la célèbre anecdote de la couronne de Hiéron. A chaque fois, en une page ou deux, il explique assez correctement ce dont il s'agit.

Quant au dernier exemple, il vaut la peine de le citer entièrement⁷⁴ :

« Dirigeons maintenant notre pensée vers les idées d'Archytas de Tarente et d'Ératosthène de Cyrène. C'est qu'ils ont fait, grâce aux mathématiques, bien des découvertes précieuses pour l'humanité. Ainsi, tout en méritant pour d'autres inventions notre reconnaissance, c'est dans les controverses sur le problème suivant qu'ils se sont surtout distingués. Chaque savant en effet élucida par une méthode différente l'ordre qu'un oracle d'Apollon avait édicté à Délos : on devait donner à ses autels un nombre de pieds cubes double de celui qu'ils avaient, et ainsi les habitants de l'île seraient alors délivrés de la malédiction divine. C'est ainsi qu'Archytas, par des tracés de demi-cylindres, et Ératosthène, par la méthode mécanique du mésolabe, résolurent le même problème ».

⁷² Pour une autre particularité du traité de la *Dioptré*, v. *infra*, Partie III.

⁷³ Livre I, Ch. 1, consacré à l'éducation des architectes.

⁷⁴ Traduction française de J. Soubiran dans [Vitruve, 1969], p. 7.

Manifestement Vitruve privilégie la narration de type "historique" plutôt que les traitements mathématiques détaillés proposés par Philon ou Héron. A la différence des trois cas précédents, le lecteur ne saura rien des détails de la solution. Soyons charitable avec Vitruve⁷⁵; c'est peut-être davantage dans les limites qu'il suppose à ses lecteurs, à leur intérêt mitigé pour les mathématiques plutôt qu'aux siennes propres, que nous devons un traitement si allusif. Mais il n'en reste pas moins vrai que l'exposé de nos mécaniciens grecs suppose, *a contrario*, un lectorat intéressé par ce genre de questions et une maîtrise mathématique non minimale de la part des auteurs.

Nos mécaniciens grecs ont aussi leurs limites et il ne s'agit pas de verser dans le propos hagiographique. Héron et Pappus ont la chance de composer leurs écrits après qu'une longue et complexe tradition de mécanique se soit développée. Depuis la fin du I^{er} siècle avant notre ère si l'on croit le récit traditionnel, le corpus aristotélicien est de nouveau accessible⁷⁶. Héron, il est vrai, cite fort peu le Stagirite, mais il reprend une partie de ses grilles conceptuelles : pour reprendre la terminologie des médecins, Héron est un "dogmatique", convaincu que la mécanique doit produire des explications *causales*. Il cite également fort peu Philon dont il connaît pourtant la tentative encyclopédique et dont il utilise certaines monographies, par exemple les *Pneumatiques*. En revanche il cite abondamment Archimède et ses contributions de mécanique mathématique, sans doute pour le "récupérer" afin de servir la cause de la mathématisation de la mécanique⁷⁷. Mais là où on pourrait espérer (c'est rétrospectivement facile) une synthèse entre ces différentes approches, aristotélicienne et archimédienne, statique et dynamique⁷⁸, monographique et encyclopédique..., il faut bien reconnaître que l'on a affaire, en particulier dans les *Mécaniques* telles qu'elles nous sont parvenues, à une simple juxtaposition des problématiques plutôt qu'à une synthèse.

Dans le même ordre d'idées, nous avons vu, tout au long de notre enquête, que la question de l'articulation entre géométrie et mécanique était centrale pour nos auteurs, et ce depuis l'Ancienne Académie et Aristote (ébauche et déjà critique du schéma classificatoire dit de Géminius) jusqu'à Pappus, en passant par Carpos, Géminius et Plutarque. Cette articulation existe indiscutablement chez Héron, mais elle se limite pour l'essentiel à un usage instrumental de la

⁷⁵ Ce n'est pas vraiment le cas de son éditeur récent, J. Soubiran qui, dans son introduction, *op., cit.*, pp. xxii—xxxii, en particulier, pp. xxvii–xxviii, souligne qu'il y a tout lieu de croire que Vitruve avait des capacités bien limitées en mathématiques.

⁷⁶ C'est très perceptible chez Héron comme l'avait relevé son éditeur, Carra de Vaux, même si les spécialistes ultérieurs (par exemple D. R. Hill, dans la préface qu'il ajoute à la réédition de Carra de Vaux) ont eu tendance à minimiser l'influence de l'aristotélisme sur notre mécanicien.

⁷⁷ Les mentions d'Archimède sont également fréquentes dans les ouvrages héroniens de mathématiques, *stricto sensu*. Là encore il faut certainement y voir une volonté de s'inscrire dans la continuité et sous le patronage du plus célèbre des mathématiciens anciens.

⁷⁸ Ces oppositions, plus ou moins pertinentes quant à la mécanique ancienne, sont traditionnelles en histoire des sciences, au moins depuis les travaux de M. Clagett. V. par ex. [Moody & Clagett], 1960, pp. 4—7. Elles sont reprises et discutées par [Jaouiche, 1976], pp. 41–46.

première dans la deuxième et à l'adoption d'un même modèle intellectuel : démonstration ou argumentation de type géométrique, réduction en "éléments"... On n'y voit pas vraiment de fécondation réciproque entre ces disciplines. Au demeurant il faut reconnaître que dans l'ensemble des textes anciens ces croisements interdisciplinaires sont rares, car même s'ils ont été pratiqués, la forme littéraire des ouvrages privilégie le découpage par disciplines inspiré par les classifications des philosophes.

Pour le cas qui nous intéresse, géométrie et mécanique⁷⁹, je n'en connais que deux : **1.** Le célèbre exemple de la méthode d'Archimède, combinant géométrie des figures, théorie des proportions, loi du levier et théorie des centres de gravité pour déterminer des aires et des volumes, ou — et il y a bien *réciprocité* — des centres de gravité. **2.** Les considérations cinématiques dans la géométrie supérieure des courbes pour la résolution des problèmes dits grammiques dans laquelle ont travaillé un certain nombre d'auteurs (dont Archimède), mais sur laquelle nous sommes assez mal informés. Il ne semble pas que Héron ait travaillé dans l'une ou l'autre de ces directions. La mathématisation du discours technologique l'a intéressé, mais à partir des outils existants; elle ne l'a apparemment pas conduit à concevoir de nouvelles théories mathématiques.

A plusieurs reprises l'intérêt pour la mathématisation nous a paru lié à des considérations polémiques, notamment dans la manière de se positionner par rapport au problème des deux moyennes, ou dans la possibilité d'envisager une théorie mécanique entendue comme science globale des mouvements, naturels ou forcés, explicitée par la préface de Pappus, écho de Héron. Inutile de dire que la mécanique ancienne n'a jamais été capable de satisfaire complètement un tel programme. On sait que la disparition de cette distinction a été fondamentale pour l'émergence de la mécanique moderne mais de fait aucun de nos auteurs anciens n'y renonce. Quelques dispositifs, tel le plan incliné, rendent comparables certains mouvements de genres différents⁸⁰. Dans quelques trop rares problèmes aristotéliens (notamment le premier sur les balances) ou

⁷⁹ Pour ce qui est des mathématiques entendues en un sens étroit les choses sont un peu différentes. Dans les termes de la classification de Géminus, on peut dire qu'elles se répartissent en quatre spécialités : arithmétique, géométrie, logistique et géodésie. Or il me semble que dans les *Métriques*, traité dont l'authenticité est bien assurée, on observe précisément une tentative de synthèse, mieux réussie qu'en mécanique. Certes, là encore il ne s'agit pas immédiatement d'extension du champ des connaissances, mais on y perçoit la volonté d'articuler différentes approches, en particulier la démarche démonstrative de la "grande géométrie" grecque (Euclide, Archimède, Apollonius...) et la démarche calculatoire ou algorithmique, à peu près universelle en mathématiques. On peut en donner d'autres justifications, par exemple que Héron travaillait dans un milieu de techniciens, beaucoup moins perméable aux spéculations philosophiques sur la classification des sciences que ne l'était un Géminus ou un Pappus. Auquel cas, il ne se proposerait pas de dépasser un certain cadre intellectuel, il l'ignorerait tout simplement. Je ne crois pas du tout à cette possibilité, car Héron est un savant disposant d'une grande culture livresque. V. *infra*, Partie III. Une autre explication, historique et diffusionniste, a été avancée dans l'historiographie récente, entre autres, par Otto Neugebauer. Pour ce grand savant et ses épigones, Héron est le représentant d'un syncrétisme où se mêlent traditions grecque et proche-orientale (v. par exemple [Neugebauer, 1969], p. 146). Ses œuvres seraient le lieu où se renouvelleraient les techniques calculatoires égyptiennes et babyloniennes d'immémoriale antiquité. Adopter cette hypothèse c'est manquer la volonté de synthèse entre calcul et démonstration, pourtant explicite dans le texte. Je n'entre pas dans les détails — cela réclamerait un autre exposé. Cf. [Vitrac, 1995].

⁸⁰ Mais l'analyse du plan incliné est présentée par Pappus (*Coll.* VIII, Prop. 8-9) comme une nouveauté (qui explique peut-être le caractère insuffisant de son exposé).

dans ceux qui sont insérés dans le Livre II des *Mécaniques* de Héron, la notion (très floue) de mouvement « plus ou moins forcé »⁸¹ est utilisée comme une explication de la plus ou moins grande facilité d'un mouvement. Mais ce sont à peu près les seuls usages opératoires de la distinction "naturel" / "forcé" que l'on trouve chez nos mécaniciens.

Restent quelques considérations générales assez intéressantes. Ainsi dans la classification de Géminus, intermédiaire entre Aristote et Pappus, la thématique du mouvement n'est pas absente. Pour faire bonne mesure, la description de la mécanique s'achève même avec l'énigmatique mention de « toute la cinétique de la matière » (πᾶσα ἡ τῆς ὕλης κινητικὴ)⁸². L'autre indication, un peu plus explicite, est la comparaison qui est faite entre les machines construites par la mécanique et les êtres vivants : ainsi la thaumatopoïétique, en particulier la construction des automates et les engins pneumatiques, imite les mouvements des vivants; c'est encore plus clair avec la sphéroποία qui opère « κατὰ μίμησιν »⁸³. Les deux comparaisons sont d'ailleurs reprises dans la préface de Pappus⁸⁴.

Deux lectures, au moins, sont possibles (d'ailleurs non contradictoires) : l'une qui marque l'opposition de l'artificiel et du naturel, du vivant et de l'inanimé et qui fait de la mécanique une sorte de parodie de physique (immédiatement après Géminus indique que l'astronomie est étroitement liée à la physique); l'autre suggère que la mécanique, au-delà des apparences paradoxales, ne fait qu'imiter la nature. C'est ce qu'affirme Vitruve sans ambiguïtés :

« Or tout mécanisme a son origine dans la nature et son principe dans la rotation du monde, qui en a été l'initiateur et le guide. De fait observons d'abord et considérons le système que forment le soleil, la lune et aussi les cinq planètes; si des lois mécaniques ne réglaient pas leur rotation, nous n'aurions pas, à intervalles déterminés, la lumière et la maturité des fruits. Lorsque donc nos ancêtres eurent observé ces phénomènes, ils prirent à la nature les modèles qu'elle offrait et, les imitant et s'inspirant des ouvrages divins, ils en tirèrent des applications utiles à l'existence. Par suite ils confièrent, pour plus de commodité, certaines de leurs réalisations aux machines et à leurs rotations ... »⁸⁵.

Des machines qui imitent la nature, ce sera aussi la position de Descartes dans les *Principes de la philosophie* (§§ 203-204), lequel en déduit que l'étude des machines permettra donc de décrypter les secrets de la Nature. Les Anciens ne vont pas si loin et, comme on peut s'y attendre, ils cherchent l'explication ultime dans les mathématiques : Héron (*Méc.*, L. II) et Vitruve (*De arch.*, X, 3. 1), chacun à sa manière, justifient la parenté entre la mécanique et l'astronomie (que nous avons relevée au passage en lisant Anatolius) par le fait qu'en dernière analyse les explications procèdent de la même source : les propriétés des mouvements simples, en

⁸¹ Par exemple, *Mechanika*, 849 a 8-9 : « ... il est raisonnable de dire que celui qui subit davantage de contrainte se mouvra plus lentement que celui qui en subit moins » (εὐλογον βραδύτερον κινηθῆναι τὸ πλείον ἐκκρουόμενον τοῦ ἑλαττον ἐκκρουόμενου).

⁸² Proclus, *In Eucl. I*, ed. Friedlein, p. 41, l. 18.

⁸³ *Ibid.*, p. 41, l. 8-14 et 16-17.

⁸⁴ Ed. Hultsch, p. 1024, l. 26-27 et p. 1026, l. 3-4 respectivement.

⁸⁵ *De architectura*, X, 1.4, traduction L. Callebaut, CUF, pp. 5-6.

particulier celles du mouvement circulaire, explication déjà avancée dans les *Mécaniques* du corpus aristotélicien.

Une mécanique globale chez les Anciens, commune aux mondes sublunaire et supralunaire, si tant est qu'elle ait vraiment existé, ne pouvait être qu'une sorte de cinématique abstraite sur la droite et le cercle, complétée par la théorie des proportions pour déterminer les conditions d'équilibre et de repos, et non pas une analyse dynamique des mouvements en termes de force et d'accélération. Le principe de décomposition des mouvements célestes, apparemment variés, en combinaisons de mouvements circulaires uniformes⁸⁶ excluait toute tentative de ce genre.

III. Héron, érudit alexandrin

Les historiens des sciences et des techniques reconnaissent deux caractères spécifiques aux travaux de l'"École" d'Alexandrie : l'encyclopédisme et la tentative de mathématisation⁸⁷. Nous venons de voir ce qu'il en était pour Héron quant au second trait. Reste que le savoir par accumulations, encyclopédies, collections, synthèses et mise en ordre a de bonnes raisons de devoir être rattaché à la Capitale des Lagides. Nous avons vu ce qu'il en était de la *Syntaxe mécanique* et j'ai mentionné d'autres exemples, avant et après, comme ceux d'Euclide et de l'auteur de l'*Almageste*. Car, ce qui est clair, c'est que ces démarches ne sont pas propres aux mathématiques et paraissent tout à fait liées à l'orientation générale qu'ont donnée les Ptolémées à leur politique culturelle et aux institutions qu'ils ont fondées pour la soutenir, entre autres, bien entendu, le célèbre Musée et sa Bibliothèque⁸⁸. Ce qui paraît clair c'est que cette orientation a infléchi les conditions du travail intellectuel, y compris la rédaction des ouvrages mathématiques.

Deux traits sont particulièrement visibles : **1.** Dans un univers où les savoirs sont devenus cumulatifs, la tâche de l'auteur est triple : trier, répéter, corriger et compléter ses prédécesseurs. Ce faisant, il devient peu ou prou historien de sa discipline; il doit se situer, tant par rapport aux "Anciens" (généralement mentionnés avec respect) qu'à ses prédécesseurs immédiats (critiqués la plupart du temps). **2.** Sa connaissance est nécessairement livresque; il n'est plus seulement un savant, mais aussi un érudit. On sait que les textes mathématiques grecs anciens s'embarrassent assez peu de considérations non strictement techniques, mais un trait nouveau de l'histoire

⁸⁶ Dès le IV^e s. avant notre ère, dans la théorie des sphères homocentriques d'Eudoxe puis, surtout, dans la théorie des épicycles et des excentriques, peut-être conçue par Apollonius et incontestablement utilisée par Hipparque (II^e s. avant notre ère). Le succès de ces "modèles" et le primat du mouvement circulaire comme mouvement simple fut tel que la tentative de l'analyser comme combinaison de mouvements rectilignes (non uniformes) que l'on trouve dans les *Mechanika* du Corpus aristotélicien est un hapax. Sur ce texte extrêmement intéressant, voir l'analyse très suggestive dans [De Gandt,1982], pp. 120-126.

⁸⁷ La démarche est un peu circulaire car on caractérise l'"École" à partir des œuvres conservées. Or, pour cette époque, on ne dispose pratiquement pas de textes scientifiques provenant d'une autre école identifiée (l'École néopythagoricienne est plus tardive et au demeurant son intérêt semble s'être limité aux sciences du quadrivium). Il est donc difficile de savoir ce qui est caractéristique d'Alexandrie et ce qui est simplement hellénistique.

⁸⁸ Pour une analyse rapide mais très suggestive, v. [Jacob, 1998]. L'exemple que privilégie Jacob est la géographie, science alexandrine par excellence (mais absente, faut-il le répéter, de la classification de Géminius).

littéraire apparaît chez des auteurs que l'on peut rattacher directement ou indirectement à Alexandrie, à partir du milieu du III^e siècle : leurs textes sont précédés d'une *lettre-préface*, ou, au moins d'un préambule. Ces lettres-préfaces sont apparemment une nouveauté, fondamentale pour nous modernes, car elles contiennent le peu de renseignements dont nous disposons sur la communauté que forment les mathématiciens de l'époque hellénistique, leurs relations mutuelles, leurs motivations... C'est évidemment le lieu où nous pouvons repérer les traces du mouvement que je viens d'évoquer, et, en faisant un petit effort de mémoire, on voit bien qu'ils sont patents dans la préface du Livre VIII de Pappus⁸⁹ que nous avons déjà passablement glosée.

Il faut remarquer que *tous* les traités conservés de Héron et considérés comme authentiques⁹⁰ sont précédés d'une lettre-préface ou d'un préambule, à l'exception des *Mécaniques* dont le début est mutilé. Je ferai volontiers l'hypothèse qu'elle existait (les Livres II et III en possèdent une) et qu'elle devait développer le genre de considérations que rapporte Pappus dans sa préface au Livre VIII (§ 2) de sa *Collection*⁹¹. L'aspect cumulatif du développement des techniques apparaît clairement dans les préfaces des traités des *Métriques* :

« Dans la mesure où l'étude mentionnée est nécessaire, nous pensons qu'il est bon de rassembler autant qu'il a été écrit par nos prédécesseurs *et ce que nous avons ajouté nous-mêmes* »⁹².

ou des *Pneumatiques*, § 1:

« L'étude de la pneumatique ayant suscité l'intérêt des anciens, philosophes et mécaniciens, dont les premiers ont déduit les propriétés de l'air suivant les règles du raisonnement, et les seconds par l'action des choses sensibles, nous pensons nécessaire de mettre en ordre nous aussi ce qui a été transmis par les anciens, *tout en y ajoutant nos propres découvertes*; ainsi ceux qui veulent après cela se tourner vers les mathématiques pourront y trouver quelque utilité »⁹³.

⁸⁹ La dimension érudite et livresque de Pappus est évidente quand il mentionne des *corpus mathématiques* constitués: la *Petite astronomie* et le *Trésor de l'analyse*, dont les Livres VI et VII de sa propre *Collection* sont en quelque sorte des *companions*, plutôt que des commentaires au sens strict. Les auteurs "alexandrins" représentent une grande part de ces corpus, tout particulièrement du *Trésor de l'analyse*, composé à partir de traités dus à Euclide, Aristée, Apollonius et Ératosthène. L'intérêt livresque de Pappus est très important pour notre connaissance des mathématiques hellénistiques : en dehors des grands corpus transmis et commentés, presque toutes nos informations proviennent des "florilèges" que constituent les Livres III, IV (pour la géométrie) et VIII (pour la mécanique) de sa *Collection*.

⁹⁰ Même certains textes d'authenticité contestée comme le manuel des *Geometrica* possèdent une préface, mais ce n'est le cas ni des *Stereometrica*, ni du *De mensuris*, ni de la *Chirobaliste*.

⁹¹ V. *supra*, Partie I, B, § 3. Comme Héron cite Archimède dans les préfaces des Livres I, II des *Métriques* et un nombre impressionnant de fois dans le corps du texte, on peut aussi penser que, comme Pappus, il mentionnait aussi Archimède dans cette hypothétique préface.

⁹² ἀναγκαίως οὖν ὑπερχούσης τῆς εἰρημένης πραγματείας καλῶς ἔχειν ἡγησάμεθα συναγαγεῖν, ὅσα τοῖς πρὸ ἡμῶν εὐχρηστα ἀναγέγραπται καὶ ὅσα ἡμεῖς προ<σ>εθεωρήσαμεν; ed. H. Schöne, p. 4, l. 4-7. C'est moi qui souligne.

⁹³ Τῆς πνευματικῆς πραγματείας σπουδῆς ἡξιωμένης πρὸς τῶν παλαιῶν φιλοσόφων τε καὶ μηχανικῶν, τῶν μὲν λογικῶς τὴν δύναμιν αὐτῆς ἀποδεδωκότων, τῶν δὲ καὶ δι' αὐτῆς τῆς τῶν αἰσθητῶν ἐνεργείας, ἀναγκαῖον ὑπαρχειν νομίζομεν καὶ αὐτοὶ τὰ παραδοθέντα ὑπὸ τῶν ἀρχαίων εἰς τάξιν ἀγαγεῖν, καὶ ἃ ἡμεῖς δὲ προσευρήκαμεν εἰσθέσθαι· οὕτως γὰρ τοὺς μετὰ ταῦτα ἐν τοῖς μαθήμασιν ἀναστρέφεσθαι βουλομένους ὠφελεῖσθαι συμβήσεται; ed. W. Schmidt, p. 2, l. 4-12; trad. [Argoud & Guillaumin, 1997], p. 25.

Quant à l'exigence de rectification (διόρθωσις), pour parler comme les géographes ou les philologues, elle est explicite dans le préambule du traité *Sur la dioptre* :

« La science de la dioptre offre un grand nombre d'applications de première nécessité et on a abondamment parlé à son sujet, aussi je pense qu'il est nécessaire de reconnaître à sa juste valeur l'héritage transmis par les prédécesseurs et qui, comme je l'ai dit, propose une application pratique; puis *de corriger ce qui est obscur en l'éclaircissant, enfin de rectifier ce qui est erroné* (τὰ δὲ ψευδῶς εἰρημένα εἰς διόρθωσιν προάξει) »⁹⁴.

Héron se pique également d'"histoire" : l'ouverture des *Métriques* lui fournit l'occasion de faire une (très) succincte histoire de la géométrie, entendue comme science des mesures, dans la lignée « de l'ancien récit », autrement dit celui d'Hérodote. Ce qui lui permet de rendre hommage à la sagacité de deux de ses illustres prédécesseurs : Eudoxe et Archimède.

Un même souci se manifeste également dans la *Dioptre*. Héron y choisit comme affabulation de deux de ses exercices d'application :

- la restitution des bornes d'un terrain à partir des deux ou trois qui restent et d'un plan⁹⁵. C'est l'opération à laquelle devaient se livrer les arpenteurs qui sont à l'origine de la géométrie selon le récit traditionnel !
- Le creusement d'un canal muni de bouches d'aération à travers une montagne pour relier deux villes, réalisation qu'on ne peut pas ne pas rapprocher du creusement, dans l'île de Samos et vers 530 avant notre ère, d'un tunnel par l'architecte Eupalinos, tunnel qui est l'une des très belles réalisations techniques de l'époque archaïque, comme le signale, là encore, Hérodote⁹⁶.

C'est même la résolution de ce problème qui commande l'architecture d'une bonne partie du traité de Héron. Celui-ci aurait sans doute été très surpris de constater que, loin de comprendre le clin d'œil de l'érudit, plusieurs historiens modernes⁹⁷ ont cru trouver dans ces problèmes et dans la préface du Livre I des *Métriques* la confirmation de ce que le travail de Héron était celui d'un arpenteur s'inspirant des antiques méthodes des Égyptiens !

Enfin la dimension savante du travail mathématique est aussi évidente dans le développement d'une tradition de commentaires : Pappus, Théon, Hypatie expliqueront les autorités que sont devenus Euclide, Apollonius, Diodore, Ptolémée, Diophante. Est-ce un effet des institutions ou non — éventuellement renforcé par une transmission sélective —, l'activité du commentaire mathématique apparaît un peu comme une spécialité alexandrine : les principaux textes commentés, à quelques (notables) exceptions près⁹⁸, sont "alexandrins", ainsi que les principaux commentateurs, du moins jusqu'au début du V^e siècle, époque de la disparition du

⁹⁴ Ed. H. Schöne, p. 188, l. 3-9.

⁹⁵ *Dioptre*, Ch. 25.

⁹⁶ *Hist.*, III, 60. Une des trois merveilles de Samos avec le môle du port et le temple de Héra. Hérodote en rapporte l'édification à la volonté du tyran Polycrate. Pour les problèmes techniques posés par la construction du tunnel, v.. [Goodfield et Toulmin, 1965], pp. 46-55.

⁹⁷ Par exemple Kline, M., *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times*. Oxford University Press, 1972, vol. 1, p. 117.

⁹⁸ Les *Phénomènes* d'Aratos de Soles, l'*Introduction arithmétique* de Nicomaque de Gêrase.

Musée. C'est ici le moment de rappeler que Héron est le premier commentateur des *Éléments* d'Euclide connu de nous. Grâce aux savants de langue arabe, nous savons que le célèbre Mécanicien avait composé un ouvrage consacré à l'élucidation des difficultés du Livre d'Euclide (*Kitâb Hall Shukûk Uqlîdis*). Il est perdu, mais cité à de nombreuses reprises par le commentateur persan an-Nayrîzî. Proclus emprunte également un certain nombre d'éléments d'exégèse à Héron. Celui-ci avait donc commenté (au moins partiellement) les *Éléments*. Il est donc raisonnable de croire que ce commentaire a été traduit et que nos auteurs de langue arabe se réfèrent à cette traduction. Certaines des citations de Proclus et d'an-Nayrîzî sont en effet substantiellement identiques. Nos deux sources se complètent et tantôt l'une, tantôt l'autre permet l'identification du matériel d'origine héronienne.

Il ne s'agissait apparemment pas d'un commentaire ligne à ligne mais plutôt d'une série d'indications mathématiques, logiques et textuelles portant sur les passages considérés comme problématiques (d'où la traduction arabe par "shukûk"). Elles portaient sur l'adjonction ou la suppression de matériaux (définitions, axiomes, cas de figure, lemmes, corollaires), l'inversion ou le déplacement de certaines propositions, la substitution de preuves différentes et même la réécriture de certaines portions du texte comme la séquence des théorèmes 2-10 du Livre II. Le but était souvent d'améliorer la structure déductive et la complétude du traité euclidien, d'éviter le recours aux démonstrations indirectes. J'ai défendu l'idée que ce *Commentaire* de Héron était apparenté aux éditions ou rééditions de textes littéraires produites par les érudits alexandrins des III^e-II^e siècles avant notre ère⁹⁹. Elles n'impliquaient pas la production matérielle d'une nouvelle version du texte édité, mais consistaient en une série d'annotations, rapportées au texte de référence grâce à un système de signes diacritiques. Cette hypothétique "réédition" de Héron serait intermédiaire entre l'édition hellénistique et celle de Théon d'Alexandrie (IV^e s. de notre ère). Quelles qu'aient été la nature et la finalité de ce *Commentaire*, il a clairement interféré avec la transmission du texte des *Éléments*, aussi bien en grec qu'en arabe. La dimension littéraire et savante d'activités telles que le commentaire, voire la réédition, d'un texte comme celui des *Éléments* n'a guère besoin d'être soulignée.

Conclusion

Même s'il est un savant lettré, Héron reste un mécanicien. Ses préfaces lui offrent donc à plusieurs reprises l'occasion de souligner l'utilité des techniques, le bénéfice que l'on peut tirer des machines et des instruments, ainsi que des sciences mathématiques¹⁰⁰. Même si ce n'est pas explicite, il y a de bonnes raisons de penser que ce trait vise ceux qui, invoquant l'autorité de Platon, se replient sur un idéal étriqué de sciences désintéressées destinées à élever notre âme vers l'intelligible et l'immatériel.

⁹⁹ V. [Vitrac, 2004], en particulier pp. 30-34.

¹⁰⁰ Utilité de la mesure et de la division des terres dans les préfaces des différents Livres des *Métriques* ; utilité de la science de la dioptrique, tant pour les applications de première nécessité que pour les autres sciences dans la préface du traité du même nom ; Utilité de la pneumatique pour les mathématiciens ...

Qu'il y ait eu une telle polémique, c'est ce que montrent les deux préfaces anonymes qui ouvrent le *Codex Constantinopolitus*, compilation de textes héroniens, mais dont le titre grandiose, c'est à noter, est *Géométrie d'Euclide* ! La première, parfaitement dans l'esprit des Héron, Carpos d'Antioche et autre Pappus, souligne la valeur instrumentale de la géométrie, considérée comme l'« œil de l'astronomie »¹⁰¹. Cette abomination ne pouvait rester sans réponse : une seconde préface, introduite par "autrement", rappelle que les principes de la géométrie procèdent de la philosophie (et non des nécessités et de l'utilitarisme) et invoque l'autorité du divin Platon¹⁰². On ne peut pas être certain que le premier texte provienne de Héron ou de son école et que l'utilité — au sens large — était sa motivation pour étudier Euclide mais, apparemment, à Alexandrie au début de notre ère, des hommes, dont Héron, ont pensé que l'on pouvait être industriel et cultivé.

Bibliographie

Editions et traductions

Archimedis opera omnia cum commentariis Eutocii, I-III. Iterum ed. I. L. Heiberg, Lipsiae, in aed. B. G. Teubner, 1910-1915 (réimpr. Stuttgart, 1972). Trois volumes : I. *De Sphaera et Cylindro* libri I-II, *Dimensio Circuli, De Conoidibus et Sphaeroidibus* ; II. *De Lineis Spiralibus, De Planorum Aequilibriis* libri I-II, *Arenarius, Quadratura Parabolae, De Corporibus Fluitantibus* libri I-II, *Stomachion, Ad Eratosthenem Methodus, Liber Assumptorum, Problema Bovinum, Fragmenta* ; III. *Prolegomena, Eutocii commentarii in libros De sphaera et cylindro, Eutocii commentarius in Dimensionem Circuli, Eutocii commentarius in libros De Planorum Aequilibriis, Scholia, Indices*.

Aristote, *Problèmes*, Edition et traduction française par P. Louis. Collection des Universités de France. Paris, Belles Lettres, 3 volumes : 1991, 1993, 1994.

{Aristote}, *Mechanical Problems. In Minor Works*, éd. et trad. angl. W. S Hett. Loeb Classical Library. Cambridge (Mass.)/London, Harvard University Press / W. Heinemann Ltd, 1936, pp. 329-411.

Euclide, *Les Eléments*. Trad. et comm. par B. Vitrac. Collection Bibliothèque d'histoire des sciences. Paris, P. U. F. En quatre volumes (Vol. 1 : Introduction générale par M. Caveing et L. I à IV, 1990; Vol. 2 : Livres V à IX, 1994; Vol. 3 : Livre X, 1998; Vol. 4 : Livres XI-XIII, 2001.

{Euclide}, *Liber Euclidis de ponderoso et levi*. Edition et traduction anglaise dans Moody, E. A & Clagett, M., *The Medieval Science of Weights*. Madison, The University of Wisconsin Press, 1960, pp. 23-31.

¹⁰¹ *Geometrica*, Ed. Heiberg, p. 172, l. 1-21.

¹⁰² *Ibid.*, p. 172, l. 22—p. 174, l. 16.

Livre d'Euclide sur la balance. Edition et traduction française par F. Woepcke, *Journal asiatique*, Sept.-Oct. 1851, pp. 220-232.

Heronis Alexandrini opera quae supersunt omnia, ed. W. Schmidt, Lipsiae, in aed. B. G. Teubner. Cinq volumes : I. *Pneumatica, De Automatis* (1899); II. *Mecanica, Catoptrica* (1900); III. *Metrica, Dioptra* (1903, H. Schöne); IV. *Definitiones, Geometrica* (1912, J.L. Heiberg); V. *Stereometrica* (1914, J.L. Heiberg).

Héron d'Alexandrie, *Belopoeica*. Ed. et trad. angl. dans Marsden, E. W., *Greek and Roman Artillery*. Vol. II : Technical Treatises. Oxford, at the Clarendon Press, 1971. Réimpr. Sandpiper Books, 1999, pp. 18-43.

Héron d'Alexandrie, *Cheiroballistra*. Ed. et trad. angl. dans Marsden, E. W., *Ibid.*, 1999, pp. 212-217.

Héron d'Alexandrie, *Les Mécaniques ou l'élevateur des corps lourds*. Trad. franç. B. Carra de Vaux. Imprimerie Nationale, 1894. Réimp. Paris, Belles-Lettres, 1988 avec une préface de de D. Hill et une étude de A. G. Drachmann.

Les Pneumatiques d'Héron d'Alexandrie. Traduction et notes par G. Argoud et J.-Y. Guillaumin avec la collaboration d'A. Cachard. Centre Jean Palerne, Mémoires XV. Publications de l'Université de Saint-Étienne, 1997.

Pappi alexandrini collectionis quae supersunt, ed. F. Hultsch, Berlin, Weidmann, 1876-78. Trois volumes : I. Libr. ii, iii, iv, v, rel.; II. Libr. vi, vii, rel.; III. 1. Libr. viii, rel., schol., suppl.; III. 2. indices; (réimpr. Amsterdam, A. M. Hakkert, 1965).

Pappus d'Alexandrie, *La Collection mathématique*. Trad. franç. P. Ver Eecke. 2 vol. Bruges, Desclée de Brouwer, 1933; réimp. Paris, A. Blanchard, 1982.

Pappus of Alexandria, *Book 7 of the Collection*. Ed., trad. angl. et comm. A. Jones. Berlin-Heidelberg-New York, Tokyo, Springer-Verlag, 1986.

Philon de Byzance, *Belopoeica*. Ed. et trad. angl. dans Marsden, *Ibid.*, pp. 106-155.

Plutarque, *Vie de Marcellus in Vies*, Tome IV. Ed. et trad. fr. par R. Flacelière et E. Chambry. Collection des Universités de France. Paris, Belles Lettres, 1966.

Plutarque, *Œuvres morales*. Collection des Universités de France. Paris, Belles Lettres, sous la direction de J. Defradas et de R. Flacelière, Tome IX, troisième Partie, *Propos de Tables*. Livre VII-IX. Ed. et trad. fr. F. Frazier et J. Sirinelli. Paris, Belles Lettres, 1996.

Procli Diadochi in primum Euclidis Elementorum librum Commentarii, ed. G. Friedlein, Lipsiae, in aed. B. G. Teubner, 1873 (réimpr. Hildesheim, 1967).

Les Commentaires sur le Premier Livre des Eléments d'Euclide. Trad. franç. P. Ver Eecke. Bruges, Desclée de Brouwer, 1948. Réimp. Paris, A. Blanchard.

Vitruve, *De l'Architecture*. Collection des Universités de France. Paris, Les Belles-Lettres. Livre I. Ed. et trad. fr. Ph. Fleury, 1990; Livre IX. Ed. et trad. fr. J. Soubiran, 1969; Livre X. Ed. et trad. fr. L. Callebaut, avec la collaboration, pour le commentaire, de Philippe Fleury, 1986.

Etudes

Argoud G. & Guillaumin J.-Y. (éds.), *Autour de LA DIOPTRE d'Héron d'Alexandrie*. Centre Jean Palerne, Saint-Étienne, 2000.

F. de Gandt, Force et science des machines dans Barnes, J. ; Brunschwig, J. ; Burnyeat, M. et Schofield, M. (eds), *Science and Speculation ; Studies in Hellenistic theory and practice*. Cambridge University Press, 1982, pp. 96-127.

Finley, M. I., Technical innovation and Economic Progress in the Ancient World, *Economic History review*, 2^e série, XVIII, 1965, traduit en français (« Innovation technique et progrès économique dans le monde ancien »), avec un supplément bibliographique, par J. Carlier, in *Économie et Société en Grèce Ancienne*, Paris, Éditions La Découverte, 1984, pp. 234-262.

Giardina, G. R., notice « Héron d'Alexandrie » dans Goulet, R. (ed), *Dictionnaire des Philosophes antiques*, Paris, CNRS Éditions, Supplément, 2003, pp. 87-103.

Gilles, B., *Les mécaniciens grecs*. Paris, Éditions du Seuil, 1980.

Goodfield J. et Toulmin S., How Was the Tunnel of Eupalinos Aligned ? *Isis*, Vol. 56. 1, 1965, pp. 46-55.

Goulet, R., notice « Anatolius » dans Goulet, R. (ed), *Dictionnaire des Philosophes antiques*, Paris, CNRS Éditions, vol. I, 1989, pp. 179-183.

Jackson, D. E. P., The arabic translation of a Greek Manual of Mechanics. *Islamic Quarterly*, 16, 1972, pp. 96-103.

Jackson, D. E. P., Towards a Resolution of the Problem of τὰ ἐνὶ διαστήματι γραφόμενα in Pappus's Collection Book VIII. *Classical Quarterly*, N.S. 30, 1980, pp. 523-533.

Jacob, Ch., "La bibliothèque, la carte et le traité. Les formes de l'accumulation du savoir à Alexandrie" dans Argoud G. & Guillaumin, J. Y. (eds), *Sciences exactes et sciences appliquées à Alexandrie* (III^e siècle av. J. C.-I^e siècle ap. J. C.). Actes du Colloque International de Saint-Étienne (6-8 Juin 1996), Publications de l'Université de Saint-Étienne, 1998, pp. 19-37.

Jaouiche, K., *Le livre du Qarastûn de Thâbit ibn Qurra*, Leiden, Brill, 1976.

Martin, Th.-H., *Recherches sur la vie et les ouvrages d'Héron d'Alexandrie*, Paris, 1854.

Neugebauer, O., *The Exact Sciences in Antiquity*. Brown University Press, 1957. Reimpr. New York, Dover, 1969.

Raïos, D., La date d'Héron d'Alexandrie : témoignages internes et cadre historico-culturel. In [Argoud G. et Guillaumin J.-Y., (eds.), 2000], p. 19-36.

Sidoli, N., Heron's *Dioptra 35* and Analemma Methods : An Astronomical Determination of the Distance between Two Cities. *Centaurus*, 47, 2005, p. 236-258.

Souffrin, P., Remarques sur la datation de la *Dioptra* d'Héron par l'éclipse de lune de 62. In [Argoud G. et Guillaumin J.-Y., (eds.), 2000], p. 13-17.

Tannery, P., La géométrie grecque, comment son histoire nous est parvenue et ce que nous en savons. Paris, Gauthier-Villars, 1887. Réimp. Sceaux, J. Gabay, 1988.

Vernant, J. P., Remarques sur les formes et les limites de la pensée technicienne chez les Grecs, *Revue d'Histire des Sciences*, 1957, pp. 203-223 repris dans *Mythe et pensée chez les Grecs*. Paris, F. Maspero, 1965, vol. II, pp. 44-64.

Vitrac, B., "Euclide et Héron : Deux approches de l'enseignement des mathématiques dans l'Antiquité ?" dans *Science et vie intellectuelle à Alexandrie (I^{er}-III^e siècle après J. C.)*. Textes édités par Gilbert Argoud. Centre Jean Palerne, Publications de l'Université de Saint-Etienne, 1995, pp. 121-145.

Vitrac, B., « Mythes (et réalités ?) dans l'histoire des mathématiques grecques anciennes » dans *L'Europe mathématique*. Eds C. Goldstein, J. Gray, J. Ritter. Éditions de la Maison des sciences de l'homme. Paris, 1996, pp. 32-51.

Vitrac, B., A propos des démonstrations alternatives et autres substitutions de preuve dans les *Éléments* d'Euclide. *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 59, N°1, 2004, pp. 1-44.

Vitrac, B., Les classifications des sciences mathématiques en Grèce ancienne. *Archives de philosophie*, 68, 2005, p. 269-301.

*