



## Les grandes orientations de la mécanique arabe (VIII<sup>e</sup>-XVI<sup>e</sup> s.) (Main directions of Arab mechanical (Eighth-sixteenth century))

**Ahmed DJEBBAR**

*Université des Sciences et des Technologies de Lille*

Received in 1 Nov 2011, Revised 12 Nov 2011, Accepted 12 Nov 2011.

Corresponding Author : [ahmed.djebbar@wanadoo.fr](mailto:ahmed.djebbar@wanadoo.fr)

### Abstract

In the Arabic scientific tradition, the various chapters of mechanics, as understood today, are divided into two distinct disciplines: the theoretical, that is to say, the static (fall and balance of body), hydrostatics and dynamics is treated in physics. The technical and applied is independent of the first and its various elements are combined in a scientific discipline that Greek science called ingenious. This is what name it was given in the Arab tradition since called *Ilm al-hiyal*. It consists of four main areas that have been developing as important as each other through the multifaceted application that has been expressed in the different layers of the new company, starting the first phase of the constitution of the Muslim state, at least for some of its chapters.

The first area is that of mechanical utility civilian. It includes the design and implementation of systems of varying complexity to address the problems of uptake of water and its delivery for consumption and irrigation. There were also mills for various purposes (mills, paper production), related gear and lifting, automated systems for lighting, locks, etc.). The second area is that of military engineering, which, for obvious reasons, needed to innovate and therefore to imagine, test and then use large-scale new weapons or those who would benefit from technological improvements. The third area includes all the mechanisms whose purpose is to entertain. This is playfulness and artistic of theoretical knowledge and know-how that has been developed as much as other areas of mechanics because it had its consumers and its ardent supporters. As this is an expensive, it is mainly wealthy individuals (caliphs, princes, wealthy merchants) that are causing the development of this sector. The fourth and final area is not really separated from the others in the texts that have survived, perhaps because it has both a utilitarian and playful, not to mention its obvious aesthetic such as clocks and, in general, different mechanisms for determining the time.

*Key words* : Arab mechanic, hydrostatic, dynamic, Water-clocks,

### Introduction

Dans la tradition scientifique arabe, les différents chapitres de la mécanique, telle qu'elle est comprise aujourd'hui, sont répartis dans deux disciplines distinctes : la partie théorique, c'est-à-dire la statique (chute et équilibre des corps), l'hydrostatique et la dynamique, est traitée en physique. La partie technique et appliquée est indépendante de la première et ses différents éléments sont regroupés dans une discipline que les scientifiques grecs ont appelée *Science des procédés ingénieux*. C'est d'ailleurs ce nom qui lui a été donnée dans la tradition arabe puisqu'on l'appelle *Ilm al-hiyal*. Elle est constituée de quatre grands domaines qui ont connu un développement aussi important les uns que les autres grâce à la demande

multiforme qui s'est exprimée dans les différentes couches de la nouvelle société, et ce dès la première phase de la constitution de l'Etat musulman, du moins pour certains de ses chapitres.

Le premier domaine est celui de la mécanique utilitaire à caractère civil. Il comprend la conception et la réalisation des systèmes plus ou moins complexes pour résoudre les problèmes de captation de l'eau et de son acheminement pour la consommation et l'irrigation. Il y avait aussi les moulins pour différents usages (minoteries, production du papier), les engins de trait et de levage, les systèmes automatisés pour l'éclairage, les serrures, etc.). Le second domaine est celui de l'ingénierie militaire qui, pour des raisons évidentes, avait besoin d'innover et donc d'imaginer, de tester puis d'utiliser à grande échelle des armes nouvelles ou celles qui allaient bénéficier d'améliorations technologiques. Le troisième domaine rassemble tous les mécanismes dont la finalité est de distraire. C'est un aspect ludique et artistique du savoir théorique et du savoir-faire qui a été développé autant que les autres secteurs de la mécanique parce qu'il avait ses consommateurs et ses fervents défenseurs. Comme il s'agit là d'une activité onéreuse, ce sont essentiellement des personnes fortunées (califes, princes, riches marchands) qui sont à l'origine du développement de ce secteur. Le quatrième et dernier domaine n'est pas vraiment séparé des autres dans les textes qui nous sont parvenus, peut-être parce qu'il possède à la fois un caractère utilitaire et un caractère ludique, sans parler de son côté esthétique évident. Il s'agit des horloges et, d'une manière générale, des différents mécanismes qui permettaient de déterminer le temps.

### **LES ORIGINES DE LA MECANIQUE DES PAYS D'ISLAM**

Le caractère utilitaire de cette discipline a conditionné son histoire dans la mesure où elle a bénéficié, à la fois, d'un apport théorique très élaboré qui fait partie du savoir savant hérité de la tradition grecque et d'un ensemble de savoir-faire locaux répondant aux besoins de ceux qui les ont inventés.

Pour le second volet de ces sources anciennes, il y avait les poulies, les treuils, les leviers, les engrenages, les mécanismes de trait avec ou sans roues. Dans le domaine hydraulique, il y avait les superbes réalisations de la Perse, les *qanâts*, qui permettaient d'acheminer l'eau sur de très longues distances, ainsi que les systèmes d'irrigation du Maghreb et de la péninsule ibérique qui existaient avant la conquête musulmane. Dans le Croissant Fertile, il y avait les norias qui permettaient à la fois de puiser l'eau à partir de niveaux inférieurs puis de le refouler vers les utilisateurs. Il y avait enfin les chadoufs et les pompes de la vallée du Nil.

Dans le domaine des moulins à eau, les habitants du centre de l'empire musulman avaient hérité des procédés grecs améliorés par les Romains. En Asie Centrale, la technologie des moulins utilisant la force du vent serait venue de Chine et elle aurait été adoptée bien avant le VII<sup>e</sup> siècle.

On est mieux informé sur les sources du savoir savant en mécanique. Les biobibliographes arabes évoquent des noms et des titres d'ouvrages qui renvoient tous à la tradition scientifique grecque. Il y a le *Livre des appareils pneumatiques et des machines hydrauliques* de Philon de Byzance (III<sup>e</sup> s. av. J.C.), l'*Epître sur la fabrication d'un orgue hydraulique* d'Apollonius (III<sup>e</sup> s. av. J.C.), le *Livre sur la fabrication des horloges hydrauliques* d'Archimède (m. 202 av. J.C.), les *Pneumatiques* et le *Livre sur les procédés ingénieux magiques* de Héron d'Alexandrie (1<sup>e</sup> s.). Il faut également ajouter à ces ouvrages, le chapitre VIII de la *Collection mathématique* de Pappus (IV<sup>e</sup> s.), intitulé « *Introduction à la mécanique* ». Les biobibliographes arabes ont même attribué à Aristote un livre intitulé « *Livre sur les procédés ingénieux* ». Comme on le voit, les références ne sont pas nombreuses mais les traducteurs arabes ont exhumé les sources essentielles de la tradition mécanique grecque.

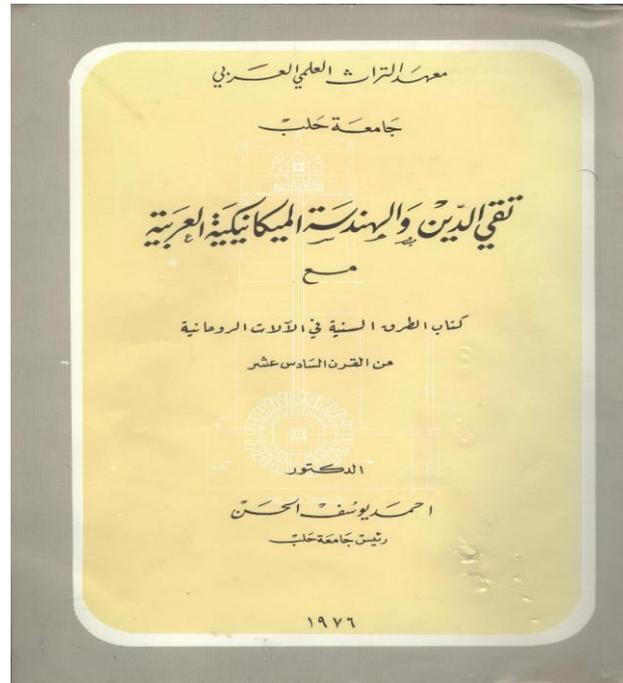
### **Les ouvrages de mécanique écrits en arabe**

Les spécialistes de mécanique des pays d'Islam ont, comme leurs collègues des autres disciplines scientifiques, commencé par étudier les écrits qui avaient été traduits en arabe. Puis, ils ont essayé de reproduire les systèmes mécaniques qui y étaient décrits en améliorant parfois certains dispositifs. Puis, ils ont été amenés, en réponse à une demande venant d'une partie de l'élite, à sophistiquer les appareils anciens décrits dans la tradition mécanique grecque, puis à imaginer de nouveaux mécanismes. Cela a favorisé la recherche dans le sens où de nouveaux concepts physiques et mécaniques ont fait l'objet d'étude et des innovations ingénieuses ont vu le jour à différentes époques.

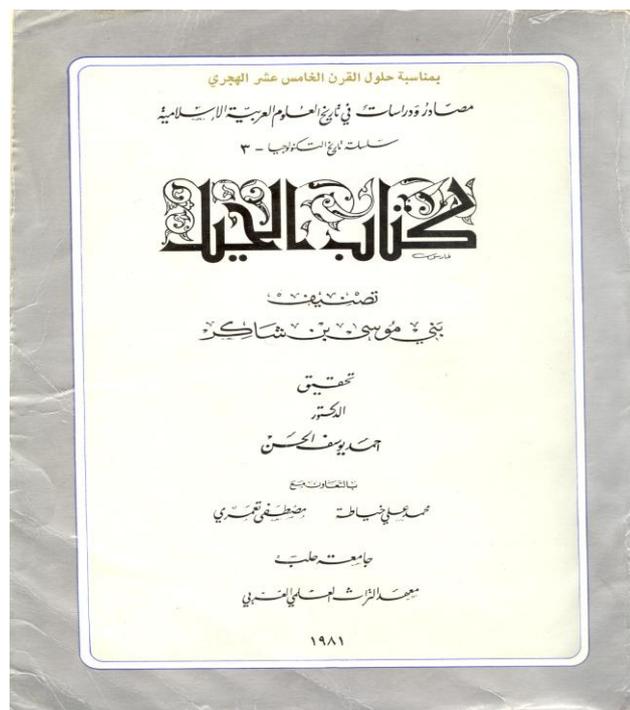
Le premier ouvrage arabe de mécanique est celui des trois frères Banû Mûsa (IX<sup>e</sup> s.). Il est intitulé simplement *Kitâb al-hiyal* [Livre des procédés ingénieux]. On y trouve la description de 100 appareils dont 9 fontaines à jets d'eau, un instrument de musique et une pelle mécanique pour ramasser des objets dans le

fond des rivières. La plus grande partie de ces appareils sont des automates utilisant différents liquides, comme le vase qui se remplit automatiquement ou le pichet qui peut verser deux liquides différents sans les mélanger.

Parmi les mécanismes de base qui interviennent dans ces appareils, on trouve des robinets, des tubes, des siphons concentriques simples ou doubles, et des soupapes. Quant aux principes qui régissent la plupart de ces instruments, ils sont semblables aux principes que l'on trouve dans la mécanique grecque, c'est à dire dans le livre de Héron d'Alexandrie (I<sup>e</sup> s. ap. J.C.) et dans celui de Philon de Byzance (III<sup>e</sup> s. av. J.C.).



Taqiy al-Dîn Ibn Ma'rûf : al-Turuq al-saniya...



Banû Mûsâ : Kitâb al-hiyal [Livre des procédés ingénieurs]



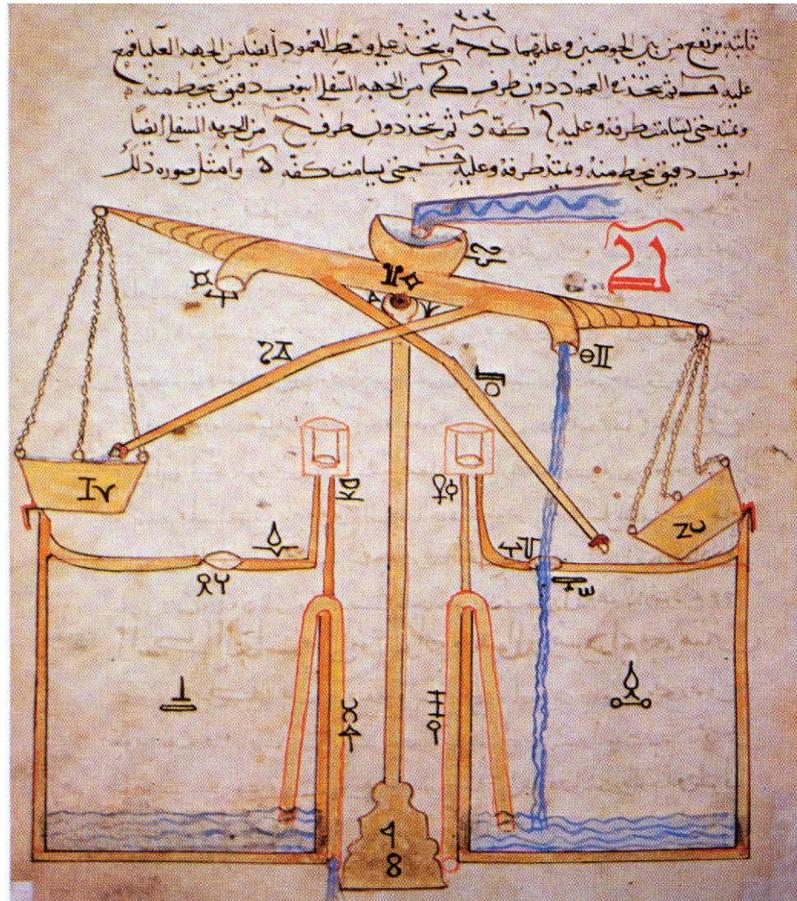
### Al-Jazarî : al-Jâmi' bayna al-'ilm wa l-'amal ...

Mais on note quelques différences importantes sur le plan technique ou théorique. On constate, en premier lieu, que les appareils décrits dans l'ouvrage sont plus complexes que ceux des auteurs grecs déjà cités, à la fois par la nature des mécanismes et par le nombre de principes mécaniques qui interviennent dans un même appareil. En second lieu, on y découvre des innovations importantes, comme l'utilisation d'un mécanisme équivalent à celui du vilebrequin et l'introduction de soupapes coniques.

Quant à l'histoire de la circulation du *Kitab al-hiyal*, elle n'a pas encore fait l'objet de recherches approfondies mais on sait que cet ouvrage a été utilisé au XII<sup>e</sup> siècle comme on le verra par la suite. Il a également fait l'objet d'études au XIII<sup>e</sup> siècle, en Syrie et en Egypte, comme nous le confirment Ibn Khillikân (m. 1282) dans son livre *Wafayât al-a'yân* [Nécrologies des gens en vue] et Ibn al-Akfânî (m. 1348) dans son livre *Irshâd al-qâsid ilâ asnâ l-maqâsid* [Livre qui guide le chercheur vers les buts les plus nobles]. L'ouvrage était également connu en Occident musulman comme en témoigne Ibn Khaldûn (m. 1406) qui dit, dans sa *Muqaddima* [Prolégomènes], en parlant de lui : "*il est entre les mains des gens qui l'attribuent aux Banû Shâkir*".

Les frères Banû Mûsâ auraient également écrit trois ouvrages traitant de problèmes de mécanique utilitaires ou d'agrément : le *Kitâb al-âlât al-harbiya* [Livre des instruments de guerre] qui n'a pas encore été retrouvé et la *Risâla fî al-âla al-latî tazmuru bi nafsihâ* [L'épître sur l'instrument qui joue de la musique par lui-même], dont une copie nous est parvenue.

L'ouvrage des Banû Mûsâ a initié une nouvelle tradition en mécanique puisqu'il a ouvert la voie à réalisation d'une série de travaux dont la publication s'est étalée entre le XI<sup>e</sup> et le XVI<sup>e</sup> siècle. Parmi les écrits qui nous sont parvenus, un seul représente la tradition mécanique d'al-Andalus. Il s'agit du *Kitâb al-asrâr fî natâ'ij al-afkâr* [Livre des secrets sur les fruits de la pensée] d'al-Murâdî (XI<sup>e</sup> s.) dont une seule copie, très abîmée, a été conservée. Tous les autres ont été publiés en Orient. Certains traitent de plusieurs domaines de la mécanique. C'est le cas du *Kitâb al-Jâmi' bayna l-'ilm wa l-'amal an-nâfi' fî sina'at al-hiyal* [Recueil de la théorie et de la pratique utile dans l'art des procédés ingénieux] d'al-Jazarî (m. après 1206) ou du *Livre des procédés nobles sur les instruments merveilleux* d'Ibn Ma'rûf (m. 1685). Les autres ne concernent qu'un seul sujet, comme le montrent clairement leurs titres. Parmi ceux qui existent encore, on peut citer le *Livre sur la science des horloges* d'as-Sâ'âtî (XIII<sup>e</sup> s.) et le *Livre élégant sur les catapultes* d'az-Zaradkâshî (XV<sup>e</sup> s.).



**Instrument de musique : آلة الزمر الدائم بالميزان [Instrument à sifflement perpétuel] (al-Jazari : al-Jâmi' ..., op. cit., pp. 430-432).**

A ces ouvrages techniques, écrits par des auteurs chez qui la mécanique a été une activité importante sinon principales, il faudrait ajouter deux écrits importants réalisés par des « non spécialistes » mais qui ont un double intérêt. En effet, ils informent sur les instruments et les appareils de leur époque et ils fournissent la terminologie qui accompagne les activités mécaniques. Il y a d'abord le *Mafâtiḥ al-'ulûm* [Les clefs des sciences] d'Abû 'Abdallah al-Khwârizmî (X<sup>e</sup> s.) qui contient un chapitre traitant d'une manière vulgarisée certains aspects de la mécanique. Le second est le *Mi'yâr al-'aql* [Mesure de l'intellect] du philosophe et médecin Ibn Sînâ (m. 1037).

## LES GRANDES ORIENTATIONS DE LA MECANIQUE ARABE

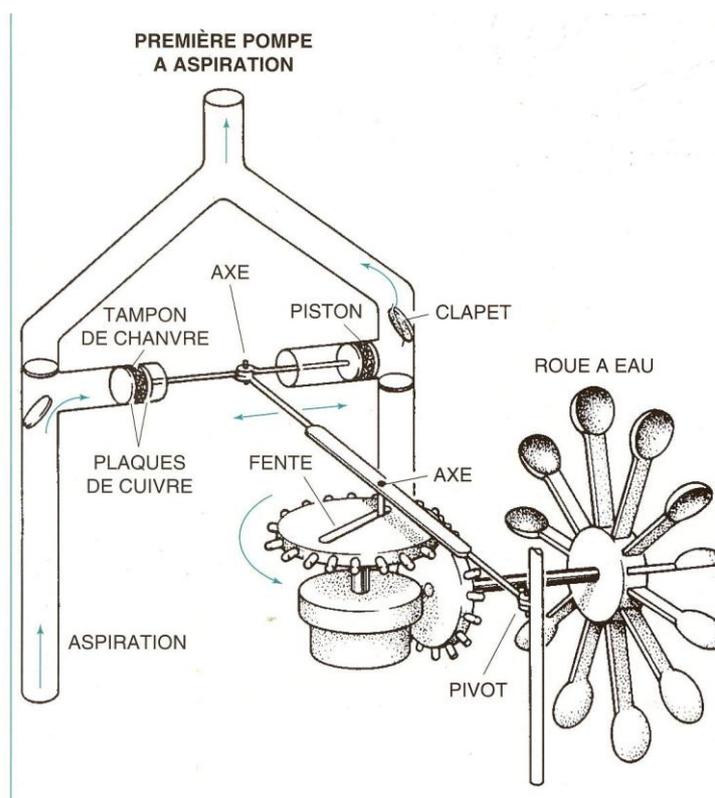
### La mécanique hydraulique

La question de l'eau a été centrale dans la vie des populations de l'empire musulman. Comme on le sait, cet espace est caractérisé en grande partie par une pluviométrie relativement faible, par des débits irréguliers ou insuffisants dans les fleuves et les rivières et par des reliefs parfois très ingrats rendant difficile la captation de l'eau ou son acheminement vers les lieux souhaités. A ces contraintes géographiques, il faudrait ajouter la situation nouvelle qui va se créer et s'amplifier avec la multiplication des villes, moyennes et grandes, l'élévation du niveau d'une partie de plus en plus grande de leurs habitants ; ce qui va entraîner le développement d'une agriculture grande et de manufactures grandes consommatrices d'eau (en particulier celles qui fabriquaient du tissu et du papier).

Cette situation n'a pas manqué de favoriser la prise d'initiative en faveur de l'entretien et de l'amélioration du rendement des procédés anciens de pompages, d'acheminement et de stockage de l'eau. Les mécaniciens ont eu donc à réfléchir à des systèmes nouveaux en vue d'augmenter le rendement et de

mieux satisfaire les besoins des citoyens. Mais avant d'exposer leurs idées technologiques, il est nécessaire de dire quelques mots des anciens systèmes hydrauliques.

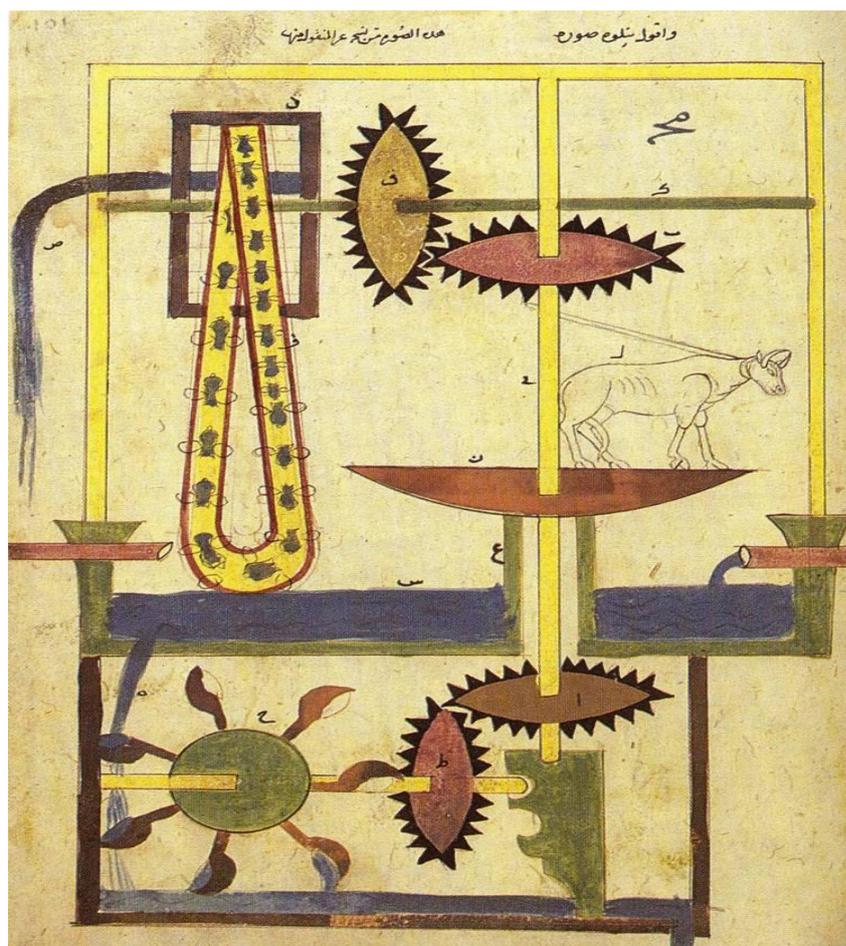
Parmi les systèmes de pompage anciens, récupérés par les mécaniciens des pays d'Islam, on trouve la pompe hélicoïdale. Il s'agit d'un tube creux incliné contenant un axe hélicoïdal. L'extrémité basse du tube est dans l'eau et l'extrémité haute est posée sur un déversoir. L'axe hélicoïdal est relié à une petite roue dentée de diamètre plus grand de sorte que lorsque cette dernière effectue un tour sur elle-même, l'axe fait 10 tours. Le mouvement de l'ensemble est donné par une roue extérieure à très grand diamètre qui est entraînée soit par un cours d'eau soit par un animal. En tournant, cette roue transmet son mouvement à la grande roue dentée qui le transmet à son tour à la petite roue dentée. Celle-ci imprime alors à l'axe hélicoïdal un mouvement rapide qui entraîne ainsi l'eau de bas en haut vers le déversoir.



**Pompe à double piston, (al-Jazari : al-Jâmi' ..., op. cit., pp. 458-465). Schéma moderne du système inventé par al-Jazari (m. 1206).**

Il y avait également la *sâqiya* (qui signifie « celle qui irrigue »). Elle servait à pomper dans les eaux stagnantes avec l'aide d'une bête de trait. L'animal (âne, mulet ou chameau) qui fournit le mouvement au mécanisme est attaché à une barre d'attelage qui est enfoncée dans l'axe d'une roue à pignon horizontale. Cette roue s'imbrique à une roue dentée verticale qui est portée par un axe horizontal au dessus du puits ou du point d'eau. Cet axe est à son tour relié à un tambour portant des godets qui, en tournant, puisent l'eau.

La *noria* (*na'ûra*) servait à capter l'eau d'un cours d'eau et la remonter au niveau souhaité en se servant du courant naturel comme force motrice. Elle est constituée d'une roue actionnée par le courant et qui transmet à un arbre une rotation régulière. Une roue dentée fixée à l'arbre transmet à son tour le mouvement à une autre roue dentée à laquelle est attachée une bielle qui transforme mécaniquement le mouvement de rotation en un mouvement de translation. Deux pistons attachés à la bielle se servent de ce mouvement de translation pour aspirer l'eau de la rivière qu'ils reversent dans un godet à la fois. À chaque mouvement, un piston aspire l'eau, l'autre la chasse et, grâce à un système de soupapes, il se constitue un courant d'eau régulier dans la conduite montante qui est reliée à un réservoir à partir duquel l'eau peut être acheminée vers les champs et les maisons.



Noria (al-Jazarî : al-Jâmi' ..., op. cit., pp. 448-453)

Mais la pompe la plus sophistiquée, on la trouve dans le livre de Taqiy ad-Dîn Ibn Ma'rûf, *at-Turuq as-saniyya fî l-âlât ar-rûhâniyya* [Les procédés nobles sur les instruments merveilleux]. Il s'agit d'un système fonctionnant avec pas moins de six cylindres. Une grande roue actionnée par un cours d'eau ou un animal fait tourner un arbre à six cames disposées autour de cet arbre de telle sorte que chaque came, successivement, entraîne l'un des six cylindres du système. Chaque cylindre se remplit d'eau et, successivement, déverse son eau, grâce à un clapet qui s'ouvre au bon moment. La synchronisation est telle que l'eau se déverse d'une manière continue grâce à l'apport de chacun des six cylindres.

### La technologie des moulins

Dans les régions où le débit des rivières et des fleuves était suffisant et régulier, on a utilisé l'eau comme force motrice pour faire actionner différents types de moulins. Ces derniers peuvent être classés en plusieurs catégories en fonction de leur gabarit, de l'énergie qui les faisait mouvoir et de leur destination. En ce qui concerne leurs fonctions, Ceux destinés à la production alimentaire (farine, riz, canne à sucre) et ceux qui avaient un rôle industriel (travail des métaux, fabrication de différents types de papier).

Les géographes et les voyageurs ont décrit des moulins qui étaient sur les berges de certaines rivières ou sur des ponts. A proximité des grandes villes bien irriguées, comme Bagdad, on préférait les installer sur des barges. A une certaine époque, la capitale de l'empire disposait d'un véritable complexe de moulins qui faisait tourner cent paires de meules à la fois. Au X<sup>e</sup> siècle, le géographe Ibn Hawqal a décrit des moulins flottants qui étaient construits en bois et en fer. Ils étaient placés dans le courant au milieu du fleuve, attachés à des chaînes de fer. Ils étaient équipés de deux paires de meules chacun. Mais bien avant lui, les frères Banû Mûsâ avaient décrit, dans le *Livre des procédés ingénieux*, un moulin appartenant à cette catégorie

Il y avait également, là où les cours d'eau n'existaient pas ou n'avaient pas un débit suffisant, l'utilisation de la force animale ou même humaine pour actionner les mécanismes de broyage. On a même pensé utiliser la

force des marées pour installer, dans la région de Bassora, des moulins qui utilisaient le flux et le reflux de la mer. A partir du 9<sup>e</sup> siècle, on a commencé à construire et à faire fonctionner, dans les régions venteuses de l'empire, comme en Asie Centrale, des moulins actionnés par la force éolienne. Cela est confirmé par le géographe Shams ad-Dîn ad-Dimashqî (mort en 1327) qui rapporte l'information suivante : "*A l'ouest du Sijistân est situé un pays où les vents sont très fréquents; c'est pourquoi les habitants emploient les vents pour faire tourner les meules (...). Ils construisent ces moulins de la manière suivante: après avoir choisi le sommet d'une montagne, une colline ou le rempart d'une forteresse, ils y élèvent un édifice comme une tour, divisé en deux parties: la supérieure, où est la meule qui, en tournant, broie le blé, et l'inférieure, mise en mouvement par les vents et faisant tourner l'axe de la meule, de telle sorte que l'axe et la meule combinés tournent à tous vents*".

Pour répondre aux besoins des habitants des villes moyennes et des grandes métropoles régionales, on a été amené à multiplier le nombre de moulins et à les concentrer dans des espaces réduits. On en a ainsi dénombré soixante dix à Nishapour à une époque donnée et même des centaines dans la seule ville de Fez, dans le Maghreb Extrême, pour la fabrication du papier et pour le broyage du blé.

Il semble, au vu de la rareté des ouvrages de mécaniques à certaines époques, que les techniques hydrauliques et les systèmes complexes qui les accompagnaient étaient le plus souvent enseignés dans le cadre d'une initiation directe de Maîtres à compagnons. En tout les cas, nous n'avons pas d'informations sur un éventuel enseignement de la mécanique. Cela dit, cet enseignement était possible dans la mesure où des spécialistes ont écrit des ouvrages dont l'exposé est très clair et qui pouvaient servir de manuels.

C'est le cas du traité d'al-Jazarî que nous avons déjà évoqué. Il renferme la description d'un certain nombre de systèmes hydrauliques dont certains étaient basés sur des idées tout à fait originales. A titre d'exemple, on y trouve un appareil à balancier qui utilise le principe de l'engrenage segmentaire. On y trouve aussi une pompe à eau fonctionnant grâce à la transformation du mouvement circulaire en mouvement rectiligne alternatif et à l'utilisation de tuyaux d'aspiration. Cette pompe utilise une roue à aube ou à palette verticale entraînée par un courant d'eau. Fixée à la roue à aube qui lui transmet le mouvement, une première roue dentée verticale entraîne une seconde roue dentée disposée horizontalement et qui est reliée à une bielle. Aux extrémités de la bielle, sont fixés deux pistons. La rotation de la roue horizontale imprime à une tige, solidaire des pistons, un mouvement alternatif qui actionne le dispositif permettant ainsi d'aspirer puis de refouler l'eau.

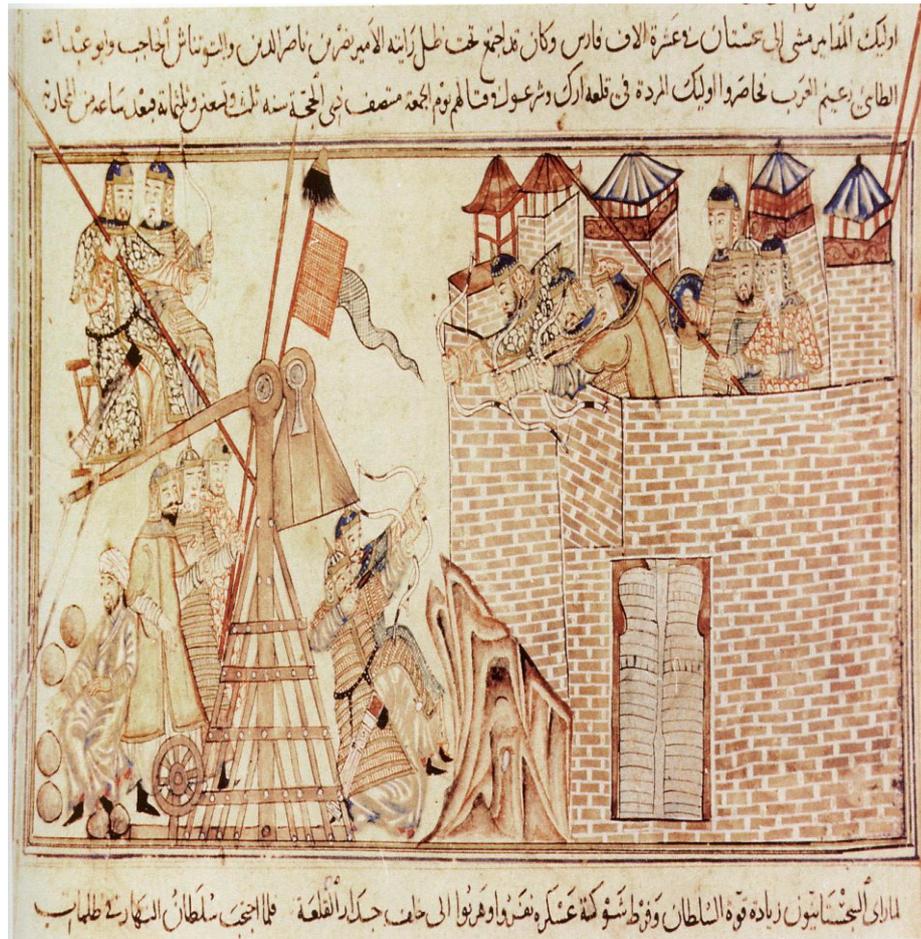
### **D'autres appareils utilitaires**

Comme conséquence du développement économique et de l'enrichissement globale des sociétés de l'empire musulman, il y a eu un phénomène de différenciation sociale qui a créé des besoins nouveaux et qui a diversifié la consommation dans les villes en fonction des revenus des habitants. Pour les couches les plus aisées on s'est mis à concevoir et à fabriquer des objets répondant à leurs besoins. On a ainsi proposé, pour protéger les habitations et les coffres à bijoux, des serrures ingénieuses réputées inviolables. C'est le cas des serrures qui se verrouillent et se déverrouillent à l'aide d'une combinaison lettres. Al-Jazarî décrit des systèmes ayant deux, quatre ou six serrures utilisant respectivement deux, quatre ou six lettres pour chacune des serrures. Il y avait également des serrures de portes utilisant un autre système de verrouillage. Dans le modèle décrit par al-Jazarî, la serrure est constituée de quatre verrous en bois ou en fer placés sur le dos d'une porte et orientés chacun dans l'une des quatre directions cardinales. Une seule clé permet de les pousser et de les ouvrir. Dans ce cas, un verrou s'ouvre vers la droite, un vers la gauche, un vers le haut et un vers le bas. Ces quatre verrous ne présentent aucun endroit par lequel un malfaiteur pourrait faire une effraction. Quand la clé, qui sert à déplacer les verrous, est retirée de la serrure, nul n'est alors en mesure d'atteindre le mécanisme de verrouillage, pour déplacer manuellement les verrous.

Comme ces systèmes étaient apparemment d'usage courant, ils étaient soumis au contrôle du *Muhtasib*, un fonctionnaire chargé de combattre les malfaçons dans les produits manufacturés et de veiller à la qualité des produits de grande consommation. Pour le cas qui nous concerne ici, ce fonctionnaire devait tester les serrures et repérer des malfaçons ou des tromperies, comme la fabrication de serrures identiques avec les mêmes combinaisons.

Les artisans fabriquaient aussi des lampes « magiques » dont la mèche sortait d'elle-même et dont l'huile s'écoulait automatiquement. Un modèle de ces lampes est décrit dans le détail par les frères Banû Mûsâ dans leur *Livre des procédés ingénieux*. L'autonomie au niveau de l'huile de combustion est assurée par les effets de la pression atmosphérique dont l'intervention est contrôlée automatiquement à l'aide d'un





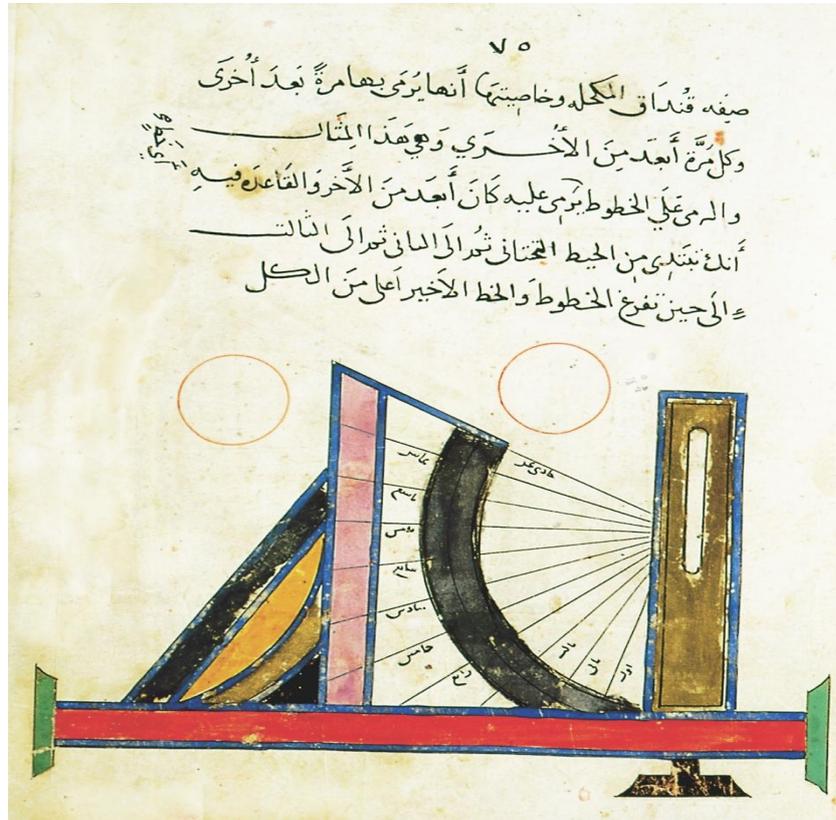
**Miniature représentant le siège d'une forteresse, avec utilisation d'une catapulte.**

Il faut attendre le XII<sup>e</sup> siècle, pour disposer de textes sur l'ingénierie militaire et sur l'organisation des armées. Dans ces écrits, trois grands sujets sont abordés. Le premier traite de l'art de la cavalerie, c'est-à-dire les tournois et les formations de combats. Parmi les ouvrages exposant ce sujet et qui nous sont parvenus, il y a le *Kitâb al-furûsiyya wa l-manâsib al-harbiyya* [Livre de la cavalerie et des combats guerriers] d'ar-Rammâh (m. 1294) et le *Nihâyat as-sûl wa l-umniyya fî ta'lîm a'mâl al-furûsiyya* [Livre de l'ultime interrogation et le souhait sur l'enseignement des exercices de cavalerie] d'al-Aqsarâî (ca. 1400). Le second thème concerne le tir à l'arc. Il contient la description des différents types d'arc en usage à l'époque, leurs procédés de fabrication et la manière de les utiliser. L'un des ouvrages réservé à ce thème est *Le vœux et l'ultime désir sur le charme des flèches* d'al-Baklamishî (m. 1394).

Le dernier thème rassemble trois rubriques importantes : L'art de la tactique, les grands principes de l'organisation militaire et différentes technologies de guerre. On y trouve, clairement exposées, des informations sur les fortifications, des techniques pour réaliser un siège, différentes manières de disposer les troupes au combat et quelques ruses de guerre. Les ouvrages les plus connus dans ce domaine sont la *Tabsira arbâb al-albâb fî kayfiyyat an-najât fî l-hurûb* [L'instruction des maîtres de l'adresse sur les méthodes de salut dans les guerres] d'at-Tarsûsî (autour 1187) et la *at-Tadhkira al-harawiyya fî l-hiyal al-harbiyya* [L'aide mémoire d'al-Harawî sur les ruses de guerre] d'al-Harawî (m. 1214).

A côtés de ces traités qui rassemblent différents thèmes ayant un lien avec l'art de la guerre mais qui réservent une place à la technologie proprement dite, des auteurs ont pensé rédiger des écrits plus spécialisés qui n'abordent que les aspects technologiques. Le plus ancien d'entre eux est le *Livre sur les instruments de guerre* des frères Banû Mûsâ (IX<sup>e</sup> siècle) dont aucune copie ne nous est encore parvenue. Au X<sup>e</sup> siècle, ce sont des scientifiques et non des « ingénieurs » ou d'anciens officiers qui se sont intéressés à un aspect très particulier de la technologie militaire. Il s'agit de l'étude théorique, en vue de réalisations concrètes, de ce que les Grecs appelaient les « miroirs ardents ». Ces instruments devaient incendier, à distance, les positions

ennemies, sur terre ou sur mer (bateaux, forteresse, garnisons, etc.). Des études très poussées ont été menées dans ce domaine, comme cela a été déjà précisé dans le chapitre consacré à la phase arabe de la physique. Mais, jusqu'à maintenant, nous ne pouvons pas affirmer que ces travaux ont abouti à la fabrication de ces armes de guerre.



**Lanceur de projectiles (al-Zaradkâshî : al-Anîq fi l-manâjanîq, op. cit., pp. 137-142).**

Pour les technologies plus classiques, comme les lanceurs de projectiles, il nous est parvenu un ouvrage du XV<sup>e</sup> siècle, intitulé *al-Kitâb al-anîq fi l-majânîq* [Le Livre élégant sur les mangonneaux] d'az-Zaradkâshî (autour 1462). L'auteur expose, dans le détail, le principe de la catapulte et il décrit tous les projectiles que cet engin peut lancer : Boulets en pierre, flèches incendiaires, boules de naphte, fusées éclairantes, bombes asphyxiantes, etc. A propos de cette arme, redoutable pour l'époque, il faut ajouter qu'à ses débuts, les armées musulmanes ont utilisé des mangonneaux qui utilisaient la force humaine. Puis, leurs techniciens ont inventé le principe du contre poids qui leur a permis de concevoir de nouveaux lanceurs, les catapultes. Cela a entraîné une grande économie d'énergies puisque les dizaines d'hommes qui actionnaient l'engin n'étaient plus nécessaires. Et, sur le plan des performances, l'innovation a permis d'augmenter, d'une manière sensible, la vitesse initiale des projectiles. Puis, à partir du XII<sup>e</sup> siècle, et au contact des Croisés qui avaient lancé des offensives contre des territoires d'Orient, les chefs militaires musulmans ont introduit la catapulte pivotante, appelée par eux « catapulte franque ». Il s'agit d'une imitation du *trébuché* des Croisés. Cet engin avait un avantage par rapport aux armes de sa catégorie dans la mesure où, grâce à son axe pivotant, il pouvait lancer des projectiles dans n'importe quelle direction.

On a également utilisé une variante de la catapulte à contre poids pour lancer des flèches assez lourdes qui ne pouvaient pas être maniées facilement par les archers. Le bac chargé de pierre des catapultes habituelles a été remplacé par une pièce en fer massif. Les flèches étaient tirées au moyen d'un crochet approprié fixé à un câble attaché au bras de la catapulte. On plaçait la flèche dans une glissière à la base de la catapulte et on réglait l'inclinaison de la glissière en fonction de l'objectif visé et de la distance.

### **Les lanceurs d'engins incendiaires et d'explosifs**

Les armées musulmanes ont conçu et produit, relativement tôt, des engins incendiaires à partir du pétrole. D'une manière plus précises, on utilisait la poix liquide seule ou mélangée avec de la résine et du soufre ou de la chaux vive mélangée à du soufre et à du pétrole. A partir d'un certain moment, deux nouveaux ingrédients ont permis d'augmenter l'efficacité de leurs substances incendiaires : le salpêtre et des dérivés de pétrole distillé. Pour lancer ces produits contre l'ennemi, ils ont utilisé différents moyens : des chalumeaux à longue portée, des pots fixés à des flèches, des grenades manuelles ou fixées à des lanceurs, des sortes de fusées ou de torpilles. Un exemple de ces petits engins « porteurs » est la fusée conçue par l'ingénieur Hasan Celebî (17<sup>e</sup> siècle). Elle est munie de 7 ailettes et elle nécessite la combustion de 60 kg de poudre à canon. Un autre engin, décrit par ar-Rammâh (mort en 1295), un célèbre maître de tournoi, est appelé "*œuf qui se meut et qui brûle*" était remplie de substances incendiaires et sa propulsion était assurée à l'aide de charges composées de salpêtre, de soufre et de charbon. La fusée était conçue pour se déplacer à la surface de l'eau. Deux fusées accrochées à la partie arrière de la torpille lui assurait la propulsion nécessaire.

On également spécialisé des canons pour lanciers des flèches et de torpilles. Ils utilisaient tous un mélange de poudres (appelé *bârûd* en arabe) constitué essentiellement de salpêtre, de soufre et de charbon de bois. En fonction des recettes, et donc des dosages, la poudre obtenue servait non seulement aux canons et à d'autres lanceurs à feu, mais elle permettait également de fabriquer des détonateurs, des flèches, des roues incendiaires et des torpilles. az-Zaradkâshî décrit un type de canon muni d'un rapporteur dont les graduations permettaient de mesurer l'inclinaison du fût du canon en fonction de la distance de la cible. Selon la forme de son fût, le canon servait à lancer des flèches, des boulets ou des engins incendiaires.

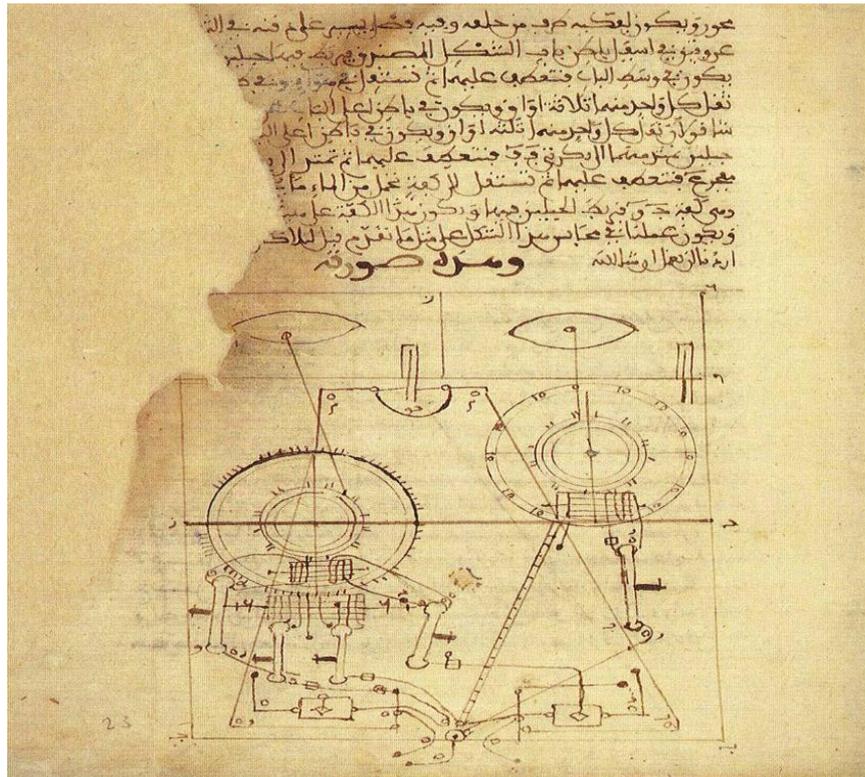
On utilisait aussi un lanceur qui utilisait la poudre. Les spécialistes pensent que nous sommes en présence de l'une des plus anciennes armes portatives utilisant de la poudre. On peut donc le considérer comme un premier modèle d'arme à feu. D'après la description qui en est faite dans un manuscrit rare qui nous est parvenu, la partie supérieure de la lance est munie d'une cavité de dix centimètres dans laquelle on place une boîte de poudre. Le projectile a la forme d'une flèche.

#### LA MECANIQUE D'AGREMENT

A notre connaissance, les sources de la mécanique ludique qui s'est développée en pays d'Islam sont exclusivement grecques. Les frères Banû Mûsâ, qui ont été les premiers à s'intéresser à ce domaine, ont d'abord étudié les contributions des mécaniciens grecs en particulier celles de Philon de byzance. Puis ils se sont mis à introduire des améliorations substantielles dans les mécanismes anciens avant de se lancer dans des innovations étonnantes pour l'époque. D'ailleurs, leur fameux ouvrage de mécanique est presque entièrement consacré aux automates. Nous n'avons pas d'informations sur d'éventuelles contributions nouvelles au cours du X<sup>e</sup> siècle. Au XI<sup>e</sup> siècle, al-Murâdî, un mécanicien d'al-Andalus, a publié un ouvrage dont une copie incomplète nous est parvenue. On y trouve la description d'automates qui ont un aspect ludique mais sont d'abord utilitaire. Nous les évoquerons dans le chapitre des clepsydres. Au XII<sup>e</sup> siècle, un important traité est publié en Orient.

Son auteur, al-Jazarî (m. après 1206), y révèle une grande capacité d'innovation, même si le contenu de son ouvrage s'inscrit dans la longue tradition arabe initiée par les frères Banû Mûsâ sur la base de l'héritage grec. Mais les éléments les plus marquants dans ce livre sont, incontestablement, les avancées théoriques que l'on a pu dégager à partir de l'analyse des mécanismes utilisés. Les automates décrits dans ce livre ne sont pas nombreux mais ce sont tous des inventions de l'auteur. Après al-Jazarî, la fabrication et l'acquisition d'automates par des gens aisés ont dû probablement se poursuivre, mais nous n'en avons pas confirmation au niveau des publications. En effet, jusqu'à ce jour, nous n'avons trouvé aucun ouvrage arabe traitant des automates et dont la publication a eu lieu entre le XIII<sup>e</sup> siècle et le XV<sup>e</sup> siècle. Mais on ne peut rien en déduire parce que ce type de rupture peut être la conséquence de la perte des écrits consacrés à ce thème.

Il faut attendre le XVI<sup>e</sup> siècle pour rencontrer un ouvrage, celui de Taqiy ad-Dîn Ibn Ma'rûf (m. 1585) qui est intitulé *at-Turuq as-saniyya fi l-âlât ar-rûhâniyya* [Les procédés nobles sur les instruments merveilleux], dans lequel sont décrits des instruments ludiques semblables à ceux qui avaient été conçus par ses prédécesseurs.



**Al-Murâdî (XIe s.) (Andalus) : Système hydraulique sophistiqué**

Parmi les instruments divertissants, il y a le distributeur de boissons différentes qui devaient être très apprécié à l'occasion de réunions mondaines. Quand on verse lentement les liquides par le haut, on voit couler le premier liquide par la buse de gauche et le second (coloré différemment) par la buse de droite. Si le liquide coloré est versé en grande quantité et avec force, on le voit couler par la buse de gauche et l'eau par la buse de droite.

#### **LES HORLOGES A EAU ET A MERCURE**

Dans l'empire musulman, la mesure du temps a été une préoccupation constante des citoyens parce que c'était une réponse non seulement aux besoins de la vie quotidienne mais également aux nécessités de la pratique religieuse. En effet, le musulman pratiquant avait besoin de connaître le moment de chacune des cinq prières quotidiennes. Il avait également besoin de disposer de calendriers ou d'informations fiables sur la fin de chaque mois lunaire et sur le début du mois suivant. L'un des plus anciens procédés permettant de déterminer le temps, d'une manière approximative d'ailleurs, utilisait le mouvement apparent du soleil. Cela consistait à suivre sur un plan horizontal ou vertical, le déplacement et l'allongement régulier de l'ombre d'une tige (appelée gnomon). Bien évidemment, ce système ne pouvait pas fonctionner la nuit. D'où l'idée de concevoir un instrument qui fonctionne selon un autre principe et qui donne l'heure jour et nuit. La plus ancienne réponse à ce problème a été le sablier. Mais, quelle que soit son caractère sophistiqué, cet instrument rudimentaire n'est pas totalement autonome et il a besoin d'une intervention humaine régulière. La seconde idée est celle qui a consisté à utiliser le phénomène naturel de l'écoulement de l'eau. C'est ce qui est la base du concept de clepsydre.

La clepsydre est une horloge basée sur le principe de l'écoulement de l'eau. D'ailleurs les premiers modèles, qui dateraient de l'époque pharaonique, se réduisaient à des récipients en forme de cône muni d'un orifice. Le temps était mesuré grâce à l'abaissement régulier du niveau de l'eau dans le récipient. Là aussi, c'est en partant d'un héritage préislamique d'origine persane et, surtout, grecque, que des clepsydras ont été conçus et réalisés, probablement dès le VIII<sup>e</sup> siècle. Cela est indirectement confirmé par l'épisode de la délégation abbasside qui a été accueillie par Charlemagne (768-814) et qui lui a offert, entre autre, une horloge à eau.

Une des plus anciennes réalisations arabes dans ce domaine, et qui a été attribuée à un scientifique, est l'horloge à douze lampes conçue par l'astronome du Caire Ibn Yûnus. Elle servait à déterminer les heures

inégaux pendant la nuit. Au fur et à mesure que les lampes s'éteignaient, on pouvait lire le nombre d'heures écoulées. La première lampe contient du pétrole pour une heure, la deuxième pour deux heures et ainsi de suite jusqu'à la douzième lampe qui en contient pour douze. Ainsi, chaque fois qu'une lampe s'éteint, elle indique qu'une heure de la nuit vient de s'écouler. On a donc l'heure en comptant le nombre de lampes éteintes. Comme il s'agit de mesurer les heures inégales, la quantité de pétrole dans chaque lampe varie en fonction des jours.

Quant à la première clepsydre à mercure, on la trouve décrite par al-Murâdî, au XI<sup>e</sup> siècle. Son mécanisme consiste en une roue qui effectue une seule rotation en 24 heures. L'échappement (c'est à dire le mécanisme qui régule le mouvement) est constitué par du mercure situé à l'intérieur de la roue, dans des alvéoles qui communiquent entre elles par de petites ouvertures. Le poids, en descendant (sous l'effet de la pesanteur), entraîne la roue; ce qui permet au mercure de s'écouler d'une alvéole à une autre et freine ainsi le mouvement du poids. La durée de la descente est fixée, par avance, à 24 h. Pendant tout ce temps, une araignée solidaire de la roue effectue un tour complet correspondant au mouvement des étoiles dans le ciel au cours des 24 h écoulées.

A peu près à la même époque, l'astronome az-Zarqâlî, qui était également connu pour son esprit ingénieux et pour grand savoir-faire dans le domaine des instruments, a réalisé deux horloges hydrauliques géantes, qui ont été installées à Tolède sur les rives du Tage. Toujours en Andalus, un technicien anonyme a conçu une clepsydre qui indiquait l'heure pour chaque signe zodiacal. D'après la description qui en est faite dans le *Libros del saber de astronomia* (XIII<sup>e</sup> siècle), le mécanisme de la clepsydre est actionné par de l'eau qui s'écoule d'un récipient placé plus haut en propulsant un flotteur situé dans un récipient placé plus bas. Le déplacement du flotteur permet de lire l'heure.

Au XIV<sup>e</sup> siècle, à Grenade, des horloges à bougies étaient utilisées. L'une d'elle a été décrite par le célèbre historien Ibn al-Khatîb (m. 1375). C'est une clepsydre qui donne les heures égales. Son boîtier est constitué d'une caisse en bois sous forme d'un polygone à 12 côtés, munie de douze portes. Au milieu de la surface supérieure est placée une bougie divisée en douze parties égales. Au fur et à mesure que la bougie brûle, des chevilles en fer freinées par un contrepoids se dégagent de la cire. Les chevilles sont placées de manière à ce que l'espace qui les sépare corresponde à une durée de combustion d'une heure. Quand une cheville tombe, le contrepoids entraîne une autre cheville qui libère une grille dans une des portes. Celle-ci tombe dans une glissière dissimulée à l'intérieur de l'horloge, provoquant l'apparition, dans la baie de la porte, d'un billet enroulé contenant la description en vers de l'heure de nuit qui vient de s'écouler. En même temps, une bille tombe dans une coupe, produisant un signal acoustique. Le nombre de portes ouvertes permet de lire les heures égales écoulées.

Cette tradition des horloges mécaniques a eu des prolongements au Maghreb. En effet, selon le témoignage de Yahyâ Ibn Khaldûn (m. 1379), le propre frère de l'auteur du *Kitâb al-'ibar* et de la célèbre *Muqaddima*, il y avait à son époque, dans la ville de Tlemcen, un ingénieur du nom d'Ibn al-Fahhâm, qui s'était spécialisé dans la conception et la réalisation de clepsydres de grandes dimensions. Nous avons d'ailleurs des preuves matérielles de la réalisation de ce type d'horloges au Maghreb, à partir des vestiges de deux spécimens : L'horloge de la Madrasa Bou 'Inâniya, à Fez, réalisée en 1362, et celle de la mosquée Qarawiyîn dans la même ville. Dans l'une d'elles, la journée est divisée en 24 heures, toutes égales, lisibles sur un cadran portant des graduations de 4 minutes en 4 minutes. Son mécanisme est actionné par de l'eau qui s'écoule faisant baisser un flotteur auquel toutes les pièces fonctionnelles sont fixées au moyen de poulies et de câbles. La régularité de l'écoulement de l'eau est assurée à l'aide d'un récipient de compensation de la pression. Toutes les 4 minutes une petite boule tombe dans une des 24 tasses en laiton, en produisant un son. Toutes les heures une grande boule en fait de même. En l'espace de 24 heures, il tombe en tout dans les tasses 360 petites boules et 24 grandes. Puis, toutes se retrouvent dans un même réceptacle. Au début de chaque heure, en plus des signaux acoustiques, une des portes en bois se referme, ce qui permet de voir, même de loin, l'ensemble du temps écoulé.

A la fin du XI<sup>e</sup> siècle, le physicien persan al-Khâzinî, a décrit, dans son livre intitulé *Mîzân al-hikma* [La Balance de la sagesse], une horloge sophistiquée. Il s'agit d'un globe céleste sur lequel sont gravées les figures du zodiaque, l'écliptique et l'Equateur céleste. Il est mû par un engrenage lui-même actionné grâce à l'écoulement du sable. Le globe, qui effectue une rotation complète en 24 heures, permet de lire l'heure avec une précision de 4 minutes. Le mouvement régulier du globe est produit par l'écoulement du sable se trouvant dans tube de verre muni d'une buse en laiton dont le diamètre de l'orifice a été calculé avec précision. Sur le sable du tube repose un poids qui se déplace vers le bas avec l'écoulement du sable. Une

corde fixée au poids est reliée à un mécanisme de roues dentées qui entraîne le globe dans une rotation uniforme. Une échelle graduée entourant l'Equateur permet de lire l'heure.

Cela dit, c'est avec al-Jazarî que l'on assiste à des progrès importants au niveau de la précision des mécanismes et au niveau de leur automatisme. Dans son livre, il écrit dix mécanismes différents, six d'entre eux sont des clepsydres et les quatre autres sont des horloges à bougies. L'une d'elles donne les heures inégales, de jour et de nuit.

L'un de ces mécanismes apparaît sous la forme d'un éléphant. Toutes les demi-heures, un personnage assis sur le dos de l'animal déplace la plume qu'il tient d'un trait de division. Ainsi, dans une durée de 24 heures égales, la clepsydre marque 48 intervalles de temps. L'horloge indique les heures et les demi-heures grâce à une figurine assise dans la tour et qui lève le bras droit à chaque heure et le bras gauche à chaque demi-heure. Le mécanisme est actionné par un flotteur semi-sphérique placé dans une bassine remplie d'eau placée à l'intérieur de l'éléphant. Le flotteur possède, dans sa partie inférieure, un orifice minutieusement calculé qui le remplit, en une demi-heure, d'une quantité d'eau suffisante pour qu'il n'ait plus de force ascensionnelle. A ce moment là, il immerge. Au même moment, une boule contenue dans la tour est libérée au moyen d'une ficelle et, en descendant, elle met plusieurs figures en mouvement : un oiseau qui tourne, la figure assise dans la tour qui lève les bras alternativement et deux serpents qui, en pivotant vers le bas, remettent le flotteur dans sa position initiale. A ce moment là, le scribe s'agite et le cornac assis sur la tête de l'éléphant fait claquer le fouet de sa main droite et bat le tambour de sa main gauche.

Al- Jazarî a également conçu une horloge nocturne utilisant des bougies et donnant les heures égales et leurs subdivisions. Au coucher du soleil, on place la bougie dans l'étui et on insère 15 boules dans le bec de l'oiseau. On positionne le style du scribe au niveau de la première division du disque (qui en contient 15 en tout, chacune subdivisées en 15 parties). Lorsqu'on allume la bougie, le style commence à se déplacer à raison d'une subdivision toutes les 4 minutes. Lorsque la pointe du style atteint la 15e subdivision, une heure s'est écoulée. A ce moment-là, le faucon laisse tomber une boule dans la soucoupe du chandelier. Et ainsi de suite, jusqu'à la fin de la nuit.

A peu près à la même époque, deux spécialistes de l'horlogerie, tous les deux syriens, se sont passionnés pour des mécanismes très sophistiqués. Il s'agit d'as-Sâ'âtî et de son père. Le premier a conçu une horloge de grande dimension, à Damas, et le second, du nom de Ridwân (m. 1221) s'est chargé de sa restauration et de sa remise en marche. Il en d'ailleurs profité pour rédiger une sorte de manuel détaillé, intitulé *Kitâb 'ilm as-sâ'ât wa l-'amal bihâ* [Livre sur la science des horloges et leur utilisation], dans lequel il a détaillé le principe de l'horloge et a expliqué son mécanisme de fonctionnement. Cet instrument original était destiné à donner les heures inégales. Il était actionné par de l'eau qui s'écoulait d'un récipient et qui propulsait un flotteur. Une évacuation régulière est obtenue par compensation de la pression. Les heures sont indiquées par une porte qui pivote sur la partie frontale après chaque signal. En outre, un croissant de lune situé au-dessus des portes indique un quart de ces périodes en se déplaçant de gauche à droite le long de 48 clous dorés. Toutes les heures, deux faucons laissaient tomber de leur bec une boule dans une coupe, ce qui provoquait un signal sonore. Pour indiquer les heures de la nuit, douze ronds lumineux apparaissaient successivement sur un cadran éclairé placé sur le toit de l'horloge.

Toujours en Orient, mais cette fois à Istanbul et au XVI<sup>e</sup> siècle, c'est au tour d'Ibn Ma'rûf, que nous avons déjà évoqué pour ses descriptions d'automates, de publier un livre consacré exclusivement aux horloges. Il s'agit *Livre des planètes précieuses pour la construction des horloges*.

### **La mécanique au service de l'astronomie**

Il faut également évoquer des systèmes mécaniques qui ont été introduits en astronomie. Ils ont concerné l'astrolabe et le zodiaque. A une époque indéterminée, on a eu l'idée de faire mouvoir l'araignée de l'astrolabe pour simuler le mouvement régulier des constellations du ciel de l'hémisphère nord. Le mouvement uniforme était assuré par un système de roues dentées accrochées au dos de l'astrolabe, et on faisait mouvoir le système à l'aide d'une manivelle. Un de ces spécimens nous est parvenu. Il est attribué à un astronome ou un artisan persan, nommé al-Isfahânî, qui l'a réalisé en 1221. La face de l'instrument porte une araignée contenant 39 étoiles fixes. Les portions de cercles de l'unique tympan de l'instrument ont été tracées pour les latitudes 30° et 34°. L'engrenage, invisible, fonctionne avec huit roues dentées. Dans la partie inférieure du dos de l'instrument, sont tracées des cercles concentriques représentant les signes du zodiaque, les subdivisions du mois en 30 jours et un cercle gradué de degré en degré. Les deux derniers cercles représentent les mouvements respectifs de la lune et du soleil. Dans la partie supérieure du dos de

l'instrument, Il y a une cavité dans laquelle se déplace un petit disque noir sur fond blanc. Ce qui reste du fond blanc représente la forme du croissant de lune à la date considérée, date qui est indiquée dans une petite fenêtre à droite du disque. En fait, cette idée qui consiste à matérialiser la croissance et la décroissance de la lune, en relation avec la partie écoulée du mois lunaire, avait déjà été exploitée, dès le X<sup>e</sup> siècle, en particulier par al-Asturlâbî et par Ibn al-Âdamî (IX<sup>e</sup> s.). Elle a été reprise par l'astronome du XI<sup>e</sup> siècle al-Bîrûnî (m. 1051) qui décrit le mécanisme dans son *Kitâb isti'âb al-wujûh al-mumkina fî san'at al-asturlâb* [Livre sur l'étude exhaustive des méthodes possibles de construction de l'astrolabe].

### Les clepsydres ludiques

Il faut enfin évoquer une catégorie de clepsydre qui avait une double fonction. En plus de leur fonction naturelle qui consistait à donner l'heure, certains de ces instruments ont été conçus comme des réalisations à la fois esthétiques et ludiques. On trouve ainsi, dans le livre de l'andalou al-Murâdî une horloge qui marque les demi-heures en déclenchant une animation de personnages. Cet automate, relativement complexe, déclenche, toutes les demi-heures environ, le mécanisme suivant : deux portes s'ouvrent et deux danseuses font leur apparition. En même temps, quatre boucs baissent la tête pour boire. Sur ce, un charmeur de serpents émerge du puits. Alors les danseuses se retirent et les portes se referment derrière elles. Les boucs relèvent la tête, puis trois serpents se dressent devant le puits. Quelques moments après, c'est le charmeur de serpents, puis les serpents, qui disparaissent à leur tour.

Un siècle plus tard, on trouve dans l'ouvrage d'al-Jazarî, déjà évoqué plusieurs fois, une horloge qui marque les heures par des jets d'eau. Dans ce modèle, l'eau est acheminée du récipient d'eau situé dans la partie inférieure vers la partie supérieure. Elle s'écoule dans le récipient supérieur droit par l'intermédiaire d'un balancier. Quand ce récipient est plein, le balancier bascule pour que le récipient gauche se remplisse. Pendant ce laps de temps, déterminé avec précision, l'eau du récipient droit s'écoule par un tube et s'échappe d'une buse située au centre du bassin inférieur en formant une fontaine jaillissante à un seul jet d'eau. A la fin de cet écoulement, le balancier bascule, de sorte que l'eau provenant du récipient supérieur gauche soit évacuée à son tour par un deuxième tube et elle s'échappe de la même manière, en formant cette fois une fontaine jaillissante à cinq jets d'eau. L'intervalle de remplissage de chaque récipient était à l'origine d'une demi-heure. Dans ce modèle il a été réduit à trois minutes.

Ce même auteur donne la description d'une variante de ce mécanisme. Dans ce second modèle, l'eau s'écoule dans le récipient droit par l'intermédiaire d'un balancier. Dans le même temps, une pelle se remplit d'eau et devient si lourde qu'elle bascule en déplaçant le balancier et permet l'écoulement de l'eau du récipient gauche. Pendant que le récipient gauche se remplit, l'eau s'échappe par deux buses distinctes : six jets d'eau sortent de la buse de gauche et un jet unique de la buse de droite. Après un certain temps le récipient gauche se vide. Les six jets passent alors à droite et le jet unique à gauche.

### BIBLIOGRAPHIE

- Al-Hasan, A.Y. & Hill, D. : *Sciences et techniques en Islam*, Paris, Edifra - Unesco, 1991.  
Al-Jazarî : *The Book of Knowledge of Ingenious Mechanical Devices*, D. Hill (trad.), Dordrecht, Reidel Publishing Company, 1974.  
Al-Zaradkâshî : *Al-Anîq fî l-manâjanîq* [Le livre élégant sur les mangonneaux], I. Hindi (édit.), Alep, Institut d'Histoire des Sciences Arabes, 1985.  
Banû Mûsa : *The Book of Ingenious Devices*, D. Hill (trad.), Dordrecht, Reidel Publishing Company, 1979.  
Dinia, A. : *Mécaniciens musulmans et évolution technique*, Rabat, 1992.  
Djebbar, A. : *L'âge d'or des sciences arabes*, Paris, Le Pommier, 2005, pp. 145-160.  
Hill, D.: *A History of Engineering in Classical and Medieval Times*, Londres, Croop Helm, 1984.  
Hill, D.: *A Treatise on machines by Ibn Mu'adh Abu 'Abd Allah al-Jayyani*, *Journal for the History of Arabic Science*, 1 (1977), pp. 33-44.  
Hill, D.: *Arabic Water-clocks*, Alep, University of Aleppo, Institute for the History of Arabic Science, 1981.