

AHMED DJEBBAR

L'âge
d'or
des
sciences
arabes



**L'âge
d'or
des
sciences
arabes**

Coéditée par les Éditions Le Pommier et les éditions de la Cité des sciences et de l'industrie, la collection « Le collège » s'inspire principalement du programme des conférences organisées par Universcience sur ses deux sites : la Cité des sciences et de l'industrie et le Palais de la découverte. Dans le même esprit – construire les outils d'une culture scientifique partagée et nourrir le dialogue science/société –, les textes, simples et originaux, sont élaborés spécialement pour la collection par les meilleurs spécialistes d'aujourd'hui.

Ce livre est paru en 2005, dans la collection « Le collège de la cité » sous le même titre avec l'ISBN 978-2-7465-0258-5. Cette édition a été mise à jour.

mise en pages : Marina Smid
relecture : Élisabeth Bélorgey pour la première édition,
Gérard Tassi pour celle-ci.

© Le Pommier/EPPDSCI, 2013

Tous droits réservés

N° ISBN 978-2-7465-0675-6

Éditions Le Pommier, 8, rue Férou, 75006 Paris

www.editions-lepommier.fr

www.universciences.fr/college, rubrique conférences

AHMED DJEBBAR

L'âge
d'or
des
sciences
arabes



*À Françoise, ma femme,
pour toutes les escapades médiévales
qu'elle a eu à me pardonner.*

Sommaire

Préface	6
Introduction	9
Les mathématiques ou <i>les sciences de l'exercice</i>	31
L'astronomie ou <i>la science de la configuration du ciel</i>	67
La géographie ou <i>la science de la configuration de la Terre</i>	105
La médecine ou <i>l'art du corps et de l'âme</i>	121
La chimie ou <i>l'art par excellence</i>	137
La mécanique ou <i>la science des procédés ingénieux</i>	153
Les sciences arabes en Europe ou <i>l'appropriation d'un savoir nouveau</i>	169
Conclusion	183
Bibliographie	189

Préface

La science arabe s'étend à l'ensemble des productions et des pratiques scientifiques réalisées en grande partie en langue arabe durant neuf siècles, du VIII^e au XVI^e siècle. Elle est née dans un contexte exceptionnel et s'est développée à la faveur de facteurs particuliers qui se sont conjugués pour créer les conditions d'une réactivation de la science en Méditerranée orientale, suivie de sa diffusion et de son enrichissement dans les espaces africain, asiatique et surtout européen.

Ses orientations, ses méthodes, ses conceptions et parfois même son contenu ont été fortement imprégnés et en partie déterminés par ce contexte. Mais les

hommes de science de la civilisation arabo-musulmane ont également eu la possibilité de se libérer de ce qui fait la spécificité de cette civilisation, pour asseoir une tradition scientifique dont le fonctionnement des acteurs et la nature de la production ont eu un caractère universel. Cette caractéristique a permis aux sciences arabes, au moment où les premiers signes du déclin ont commencé à se manifester, de connaître une seconde vie dans un espace culturel nouveau, celui de l'Europe des XII^e-XV^e siècles, qui se distinguait nettement de son environnement originel.

Dans cet ouvrage, nous nous proposons d'aborder tous les aspects qui viennent d'être évoqués à travers sept chapitres. La partie introductive permettra de contextualiser les premiers pas de cette nouvelle tradition scientifique en décrivant ses liens avec les héritages antérieurs et avec son environnement politique, culturel et idéologique. Elle évoquera en particulier le phénomène de traduction du savoir ancien

et son rôle à la fois dans le contenu de la nouvelle tradition et dans ses orientations futures.

Les chapitres suivants exposeront les éléments les plus significatifs de la contribution scientifique arabe dans les domaines les plus importants, quantitativement et qualitativement : les mathématiques avec quelques-uns de leurs domaines d'application, l'astronomie avec ses prolongements (concernant, en particulier, la conception d'instruments de mesure et la cartographie), la médecine avec ses dimensions théorique et pratique, la chimie comme science de l'expérimentation et la mécanique à travers ses aspects utilitaires et ludiques.

Le dernier chapitre est consacré à l'important problème de la présence en Europe, à partir de la fin du XI^e siècle, d'une partie des sciences arabes, à travers trois vecteurs essentiels : les instruments scientifiques, les livres et les hommes.

Introduction

L'islam en tant que nouvelle religion se manifesta au prophète Muhammad (570-632) autour de l'année 610, avec la révélation des premiers versets du Coran. La seconde date importante, 622, marque le début d'un autre phénomène, celui de la constitution du premier État musulman à Médine, où le Prophète s'était réfugié après avoir été chassé de La Mecque par des membres de sa propre famille. La période allant de 622 à 661, qualifiée de période « des califes bien dirigés », est marquée à la fois par les grandes opérations de conquête qui ont ouvert d'immenses espaces à la nouvelle religion, et par les conflits qui ont

éclaté entre différents groupes de musulmans (pour des raisons essentiellement politiques, liées à la conception de l'État) et dont les répercussions seront énormes par la suite. Puis, de 661 à 750, s'étend le règne de la dynastie omeyyade (du nom de Omeyya, l'un des membres de la famille du Prophète), qui a choisi Damas pour capitale. Cette période correspond aussi à la seconde et dernière phase des conquêtes qui ont élargi encore davantage le territoire de l'Islam, puisqu'il s'étend désormais de Samarkand, à l'est, à Saragosse, à l'ouest. L'éviction violente de cette dynastie par de nouveaux prétendants, les Abbassides (qui étaient leurs cousins), a ouvert une ère nouvelle à la fois sur les plans politique, économique, culturel et scientifique.

On considère en effet généralement que c'est pendant le califat d'al-Mansûr, de 754 à 775, que furent prises les premières initiatives en faveur de la science. Mais, à y voir de plus près – et les recherches de

ces dernières décennies nous encouragent à le faire –, ces initiatives furent l'aboutissement d'un long processus qui n'a pas attiré l'attention des historiens parce qu'il ne fut marqué par aucun événement spectaculaire : il s'agit des transformations et parfois même des bouleversements qui ont eu lieu au centre de l'Empire puis à sa périphérie durant tout le siècle qui précéda la fondation de Bagdad en 762. Ces transformations ne concernaient pas directement les activités intellectuelles en général, mais plutôt leur environnement qui, dans une seconde phase, a eu en retour un impact sur elles.

La première conséquence des conquêtes a été la constitution d'un vaste espace économique en contact avec l'extrême Asie (Inde et Chine), l'Europe et l'Afrique subsaharienne. Ces trois régions ont d'ailleurs joué un rôle déterminant dans le cadre de l'alimentation du nouveau marché en matières premières, en produits

de consommation à forte valeur ajoutée et en produits stratégiques comme l'or et l'argent. L'unification politique des territoires conquis a en outre éliminé les frontières économiques qui correspondaient à celles des États antérieurs à l'avènement de l'Islam. Cela a favorisé une plus grande fluidité dans la circulation des marchandises et la disparition ou l'allègement des multiples taxes qui les renchérisaient. La conséquence de tous ces phénomènes a été, à moyen terme, un enrichissement considérable de l'élite du pouvoir et d'une partie de la société civile (marchands, militaires, hauts fonctionnaires, hommes de loi...). Des villes nouvelles ont alors vu le jour et elles se sont mises à adopter le même mode de vie et le même type de consommation que la capitale de l'Empire.

Le second élément à souligner est la diversité des populations et des communautés dont les membres sont devenus des sujets du nouveau pouvoir.

Ce qui a joué, indiscutablement, en faveur d'une réactivation des sciences. En effet, en Asie centrale, lorsque les musulmans ont contrôlé le territoire de l'ancienne Perse, ils y ont trouvé des élites actives et des praticiens de bon niveau dans des domaines comme la médecine, l'astrologie et la comptabilité. La région avait aussi profité de sa situation de zone de contact avec l'Inde, en particulier au cours des VI^e-VII^e siècles. Comme adversaire de l'Empire byzantin, elle avait également bénéficié, indirectement, de la répression qui avait visé des penseurs grecs comme Simplicius (V^e siècle), puisque ce dernier et ses collègues ont été accueillis à Ctésiphon où ils ont pu poursuivre leurs activités philosophiques et scientifiques.

Dans le Croissant fertile, les conquérants arabes ont découvert une mosaïque de communautés qui se distinguaient par leurs langues (arabe, syriaque, grec, hébreu) et par leurs confessions (païens, juifs, chrétiens nestoriens, jacobites ou coptes).

Leurs activités intellectuelles sont connues parce qu'ils nous ont laissé des écrits qui en témoignent encore. Elles étaient concentrées dans des villes prestigieuses comme Harran, Nisibe, Antioche, ou dans des monastères comme ceux de Kenesrin et de Râs al-'ayn. Depuis le *v^e* siècle au moins, et tout au long des deux siècles suivants, certaines de ces communautés avaient traduit de nombreux textes grecs en syriaque et en avaient écrit d'autres. Leurs disciplines favorites étaient la philosophie et la théologie, mais ils se sont également intéressés à l'astronomie et aux mathématiques, comme le confirment certains écrits de cette époque qui ont été préservés. Parmi les auteurs de cette tradition, Sévère Sebokht est celui qui nous intéresse le plus ici, puisqu'il a publié des ouvrages d'astronomie et, en particulier, une épître sur l'astrolabe. Il connaissait également certains apports indiens en mathématiques, car il les a évoqués explicitement. Son œuvre a été poursuivie

par ses élèves, parmi lesquels on peut citer, au VII^e siècle, Jacques d'Edesse, qui traduisit une partie de la somme médicale de Galien (qui date du II^e siècle), et Athanase, qui a participé à la traduction, en syriaque, de certains textes grecs, comme l'*Isagoge* de Porphyre et l'*Organon* d'Aristote.

La conquête de l'Égypte, en 642, a favorisé la circulation directe du savoir alexandrin, ou du moins ce qu'il en restait après la longue période de déclin s'étendant du IV^e au VII^e siècle. La prestigieuse bibliothèque du Musée, à Alexandrie, n'existait plus, victime d'un incendie qui se produisit avant l'avènement de l'Islam. Mais la ville avait conservé des bibliothèques privées qui se sont révélées très précieuses lorsque les activités scientifiques en langue arabe ont connu leur première impulsion. La ville n'avait plus son dynamisme intellectuel d'antan, mais elle avait préservé quelques foyers d'activités, en particulier en médecine et en philosophie. Parmi ceux qui

y avaient pratiqué la philosophie quelque temps avant l'arrivée des musulmans, on peut citer Jean Philopon au VI^e siècle. Au VII^e siècle, Alexandrie entretenait encore la tradition de Galien grâce à des médecins comme Paul d'Égine et le prêtre Ahrûn.

On peut donc être sûr que, tout au long de la période qui a précédé l'avènement de la dynastie abbasside, certaines activités, comme la médecine, l'astrologie, la comptabilité et le mesurage, étaient enseignées et pratiquées en syriaque ou en grec. La langue arabe était présente, bien sûr, mais cantonnée essentiellement à deux domaines. Le premier englobait tout ce que l'on avait pris l'habitude d'appeler « sciences religieuses », c'est-à-dire l'ensemble des études portant sur le contenu du Coran et celles concernant l'authentification et la classification du contenu du Hadîth (corpus constitué par les paroles, les actes et les décisions du Prophète). Le second regroupait toutes les disciplines dont l'objet

d'étude était précisément la langue arabe. Ce fut d'abord la poésie, fleuron de la culture des habitants de l'Arabie, puis les domaines nouveaux comme la lexicographie, la grammaire, la morphologie et, plus tard, la linguistique. Vers la fin du VII^e siècle, une décision importante fut prise par le calife omeyyade 'Abd al-Malik, qui régna de 685 à 705 : l'arabisation des administrations de l'Empire, à commencer par celles de la capitale, Damas. Il n'est pas inutile de noter que, dans le même temps, ce calife a pris une décision financière et économique d'importance : la dévaluation de la monnaie bimétallique (argent et or), probablement pour tenter d'affaiblir les monnaies concurrentes, en particulier celle de Byzance.

Une des conséquences de la première décision a été l'arabisation, relativement rapide, du savoir ancien qui s'était maintenu dans les sociétés du centre de l'Empire grâce à une transmission orale, dans le cadre des différents métiers de l'époque,

tels que l'arpentage, la répartition des héritages, le calcul et la collecte de l'impôt, la gestion des soldes des armées et des fonctionnaires. Il faut d'ailleurs remarquer que l'on n'a pas observé de résistance à cette arabisation « par décret », qui a été, de fait, une préparation à l'opération de grande envergure qui suivit : la traduction en arabe des manuscrits scientifiques grecs et indiens. Il semble même que cette arabisation des savoirs savants a été encouragée par ceux-là mêmes qui avaient le monopole du savoir ancien et qui le pratiquaient dans leur langue maternelle : elle constitua pour eux une opportunité en leur permettant de conserver un statut qui commençait à être remis en question par les nouvelles générations de cadres arabisés.

La phase de traduction _____

Le très sérieux biobibliographe du ^{x^e} siècle Ibn an-Nadîm raconte, dans son livre

intitulé *Le Catalogue*, que c'est à la suite d'un rêve durant lequel il se serait entretenu avec Aristote en personne que le calife al-Ma'mûn, qui régna de 813 à 833, aurait pris la décision de financer la collecte et la traduction des manuscrits scientifiques et philosophiques grecs.

Le rêve du calife al-Ma'mûn

Al-Ma'mûn vit, dans son rêve, un homme de teint blanc tirant vers le rouge, avec un large front, des sourcils qui se touchent, une tête chauve, des yeux bleu sombre et de beaux traits, assis sur son siège. Al-Ma'mûn dit : « J'étais, en face de lui, rempli de crainte. Je lui demandai : Qui es-tu ? Il dit : "Je suis Aristote". Je fus enchanté de me trouver avec lui et je lui demandai :

- Ô philosophe, puis-je te questionner ?
- Questionne.

- Qu'est-ce que le bien ?
- Ce qui est bien selon l'esprit.
- Et ensuite ?
- Ce qui est bien selon la Loi.
- Et ensuite ?
- Ce qui est bien selon l'opinion des gens.
- Et ensuite ?
- Il n'y a pas d'ensuite. »

Ibn an-Nadîm: *Al-Fihrist*
[Le Catalogue], G. Flügel (édit.), Leipzig,
1881-82, vol. II, p. 243.

La réalité est moins simple. Il semble que, dès le VII^e siècle, les souverains musulmans de la dynastie omeyyade aient cherché à se procurer des ouvrages jugés utiles pour la gestion des affaires de l'Empire, comme ceux qui étaient censés prédire les événements grâce aux outils astrologiques ou ceux qui contenaient un savoir-faire militaire. Mais il est vrai que c'est durant la dynastie

abbasside que le phénomène de traduction connut une impulsion sérieuse, qui débuta avec al-Mansûr, le deuxième calife de cette prestigieuse dynastie. C'est à son époque et sur son initiative que le premier ouvrage astronomique et mathématique indien a été traduit en arabe à partir du sanskrit. C'était là le premier acte officiel d'un mécénat d'État en faveur des sciences. Ce calife a également financé la traduction d'ouvrages de logique et de médecine. Pour cette dernière discipline, on s'est d'abord contenté de traduire du grec en syriaque, parce que la corporation était alors composée, en majorité, de chrétiens ou de païens ayant fait leurs études médicales dans cette langue. À partir du règne du calife al-Mahdî (775-785), on observe une extension du mécénat à des membres de l'élite, comme des marchands ou des hauts fonctionnaires.

Une partie de cette élite était d'origine persane, ce qui favorisa le transfert du savoir scientifique écrit dans leur langue,

le pehlevi. Le califat de Hârûn ar-Rashîd, entre 785 et 809, a approfondi et accéléré ce phénomène grâce à trois facteurs déterminants.

Le premier de ces facteurs est l'émergence d'une communauté de scientifiques arabisés, conscients de leur rôle et dont certains membres avaient d'importants moyens financiers. Leur intérêt pour l'héritage ancien les a impliqués, plus que les autres mécènes, dans l'opération d'appropriation des savoirs anciens qu'ils ont aidé à inscrire dans la durée. Parmi les figures représentatives de cette communauté, il y eut, au IX^e siècle, le fameux philosophe et mathématicien al-Kindî et, surtout, les trois frères Banû Mûsâ, qui ont dépensé une bonne partie de la fortune que leur père avait léguée pour acquérir et faire traduire des copies rares de traités de physique et de mathématiques.

Le deuxième facteur est technologique puisqu'il s'agit de l'avènement du papier.

À la suite d'une première expérience de fabrication de papier réalisée à Samarkand, le pouvoir de l'époque prit la décision de construire une seconde fabrique à Bagdad. D'autres métropoles suivirent. Cela constitua une véritable « révolution », dans une société où les seuls supports connus jusqu'alors avaient été le papyrus et le parchemin, qui n'étaient pas accessibles à toutes les bourses. Avec ce nouveau matériau que l'on pouvait fabriquer avec des produits peu onéreux comme le chanvre ou les vieux chiffons, le savoir allait connaître une relative démocratisation et, surtout, une plus grande fluidité dans sa circulation au sein du vaste Empire musulman.

Le troisième et dernier facteur, lié au précédent, est la multiplication des bibliothèques. Nous savons que, dès l'époque omeyyade, des bibliothèques califales ont commencé à se constituer. Cette tradition princière et étatique s'est d'ailleurs maintenue avec les Abbassides

et, plus particulièrement, avec Hârûn ar-Rashîd et son fils al-Ma'mûn, qui ont respectivement fondé et largement financé le Bayt al-hikma (la *Maison de la sagesse*), dont l'élément essentiel était la bibliothèque. Puis des personnes privées, princes, marchands, scientifiques, ont pris le relais. Le phénomène s'est accéléré avec la diffusion du papier qui rendait accessibles les copies de livres (et fut encore favorisé par le fait que, à l'époque, il n'y avait pas de droits d'auteur).

Comme cela sera explicité dans les chapitres suivants, les traductions en arabe, à partir du grec, du syriaque, du persan et du sanskrit, ont concerné toutes les disciplines scientifiques qui avaient été pratiquées avant l'avènement de l'Islam et dont des écrits ont pu être exhumés. Dans les premières décennies, on s'est contenté de traduire des documents accessibles. Puis on s'est mis à chercher les manuscrits dans tous les endroits de l'Empire où l'on

signalait d'anciennes bibliothèques. Et, très vite, les sources locales se tarissant, on s'est résolu à s'adresser aux Byzantins, pourtant en guerre larvée avec le pouvoir musulman. Autour de cette quête du savoir des autres, des faits ont été consignés, y compris des anecdotes probablement fabriquées de toutes pièces. Toujours est-il qu'il nous est parvenu les noms des pionniers de ces traductions, qui ont d'abord fait partie d'une mission scientifique chargée par le pouvoir abbasside de visiter les monastères et les bibliothèques de Byzance, à la recherche d'ouvrages scientifiques et philosophiques. Il nous est également parvenu une liste impressionnante de traducteurs qui ont exercé leur talent aux VIII^e-IX^e siècles avec, parfois, le relevé précis des ouvrages qu'ils ont traduits.

En conclusion, il nous faut insister sur plusieurs points liés à ce phénomène. Le premier concerne l'origine des traducteurs. Il s'agit de sujets de l'Empire que les

événements culturels ont propulsés au premier plan parce que leur profil les prédisposait à cette tâche. De confessions différentes et d'horizons divers, leur dénominateur commun était la maîtrise de la langue arabe et de l'une des langues dans lesquelles les sciences avaient été écrites. Dans la première phase des traductions, la majorité d'entre eux était de confession chrétienne; les choses ont ensuite évolué vers une plus grande diversité.

Le deuxième point est lié à la qualité des traductions. Un des éléments révélateurs du professionnalisme de la majorité des traducteurs est le jugement porté par les utilisateurs de leurs travaux: lorsqu'ils se sont prononcés, ils n'ont pas hésité à dire de tel traducteur qu'il était moins précis ou qu'il avait une meilleure technique que tel ou tel autre. Le second élément est révélé par le nombre de versions arabes réalisées parfois à partir d'un même ouvrage. Ce fut le cas de certains ouvrages de mathématiques,

d'astronomie et de philosophie. L'exemple le plus connu est celui des *Éléments* d'Euclide, un monumental traité de géométrie comprenant 115 propositions, réparties en 13 chapitres. En plus de la version syriaque qui circulait encore, une première traduction en arabe a été réalisée à la fin du VIII^e siècle par un musulman, al-Hajjâj, qui l'a dédiée au célèbre calife Harûn ar-Rashîd (786-809). Le même traducteur réalise, au début du IX^e siècle, une seconde version qu'il dédie cette fois au nouveau calife al-Ma'mûn (813-833). Quelques années plus tard, c'est un chrétien, Ishâq Ibn Hunayn, qui publiera une troisième version. Cette dernière sera révisée par un scientifique de confession païenne, le fameux mathématicien Thâbit Ibn Qurra.

Le troisième et dernier point a trait aux activités scientifiques suscitées par l'étude de l'héritage ancien. D'après les informations que nous détaillons dans les

chapitres suivants, les premiers praticiens de la science en arabe n'ont pas attendu que toutes les traductions soient faites pour se lancer dans leurs propres recherches et publications. Il semble que le terrain ait été préparé bien plus tôt, au cours de la période de maturation du VIII^e siècle où des pratiques scientifiques, certes modestes, existaient déjà, soutenues par un enseignement et quelques publications. Ce qui permet de comprendre que, dès la première moitié du IX^e siècle, c'est-à-dire au cours de la période où l'activité de traduction a été la plus intense, apparaissent des œuvres originales, comme le livre d'algèbre d'al-Khwârizmî ou la mappemonde qui porte aujourd'hui le nom du calife al-Ma'mûn, son commanditaire.

Comme on le verra aussi, les orientations essentielles des sciences arabes ont été fortement conditionnées par les spécificités de chacune des traditions anciennes dont elles se sont nourries et par ce qu'il leur

est parvenu de ces traditions au niveau du contenu et des problèmes non résolus. Quant aux démarches qui ont caractérisé ces pratiques, elles apparaissent, globalement, comme le résultat d'une synthèse heureuse entre toutes celles que les traductions ont transmises, avec toutefois des apports originaux, en particulier en physique, en chimie et en médecine. Le plus important de ces apports a été la prise en compte de l'expérimentation comme démarche scientifique à part entière et comme outil d'investigation et de justification, au même titre que les outils théoriques hérités des Grecs.

Les mathématiques ou *les sciences de l'exercice*

Au cours de la période allant du milieu du VII^e siècle à la fin du VIII^e siècle, c'est-à-dire pendant les cent cinquante premières années de l'Islam, les mathématiques pratiquées dans le nouvel Empire correspondaient essentiellement à un savoir-faire géométrique et arithmétique permettant de résoudre des problèmes de la vie de tous les jours. La géométrie était utilisée dans les procédés de mesurage, l'architecture et la décoration. On s'y servait de figures planes et de solides, on mesurait la longueur de segments rectilignes ou courbes, on calculait des aires et des volumes d'une manière exacte ou approchée. On construisait

aussi des objets géométriques dans un but artistique, en recomposant de nouvelles figures à partir de figures données ou en découpant des surfaces selon des rapports donnés.

Quant aux pratiques arithmétiques, elles utilisaient trois types d'outils. Il y avait tout d'abord des systèmes de numération qui correspondaient à différentes traditions de calcul : la première était instrumentale et utilisait les doigts de la main pour compter et pour noter les nombres ; la deuxième était mentale et ses résultats s'exprimaient verbalement ; la troisième enfin, probablement la plus récente, se pratiquait par écrit, à l'aide des chiffres. Il y avait ensuite un ensemble de procédés arithmétiques qui servaient à réaliser les cinq opérations classiques, c'est-à-dire l'addition, la soustraction, la multiplication, la division et l'extraction de la racine carrée. Ces opérations ne concernaient pas uniquement les nombres

entiers. On utilisait surtout les fractions, qui intervenaient dans les différentes transactions de la vie quotidienne : opérations de change, conversions des poids et mesures, répartition des héritages, etc. À un niveau supérieur, des procédures complexes permettaient de résoudre différents types de problèmes propres à certains corps de métiers. Pour aider les élèves à maîtriser ces opérations, on leur apprenait à manipuler des algorithmes pour déterminer les solutions de problèmes concrets ou totalement fabriqués.

Nous ignorons comment ces savoirs étaient enseignés. Il y avait probablement quelques écoles entretenues par des communautés qui en avaient les moyens et où l'on enseignait dans la langue pratiquée. C'est ce que confirme un témoignage du célèbre traducteur du IX^e siècle Hunayn Ibn Ishâq, qui ne précise néanmoins pas si les mathématiques étaient dans les programmes. Peut-être aussi existait-il des

manuels contenant outils et procédures de calcul, mais aucun ne nous est parvenu. On pense que la publication des nouveaux manuels en arabe, qui se fit à partir du IX^e siècle, a été l'occasion d'y intégrer une partie des savoirs mathématiques qui circulaient avant l'avènement de l'Islam.

Il semble que, à côté de ces savoir-faire aux origines diverses, souvent non identifiées et répondant aux besoins des différentes corporations, des pratiques savantes modestes, basées sur des ouvrages anciens bien connus ou sur des manuels d'enseignement, avaient cours parmi une certaine élite. Elles étaient dispersées dans ce qui restait des centres intellectuels ayant fleuri dans la région et qui avaient pris le relais d'Athènes dans le domaine de la logique et de la philosophie en général.

Citons, comme exemples de ces écrits mathématiques ou astronomiques antérieurs à l'avènement de l'Islam, la version syriaque des *Éléments* d'Euclide

(III^e siècle av. J.-C.), dont des fragments nous sont parvenus, ainsi que deux épîtres sur l'astrolabe, la première, en grec, de Jean Philopon (première moitié du VI^e siècle) et la seconde, en syriaque, de Sévère Sebokht, qui vécut au VII^e siècle. À cela, il faudrait peut-être ajouter des manuels en persan ou des enseignements oraux prodigués dans cette langue et contenant des éléments d'astronomie ou de calcul (ou les deux), dont certains ont pu circuler à une date indéterminée, mais antérieure à l'avènement de l'Islam, à partir de l'Inde ou de la Chine. C'est sûrement le cas de la notion de base décimale positionnelle, propre à la tradition indienne du calcul.

La phase de traduction

Rappelons que les premières traductions en arabe d'ouvrages mathématiques datent de l'époque du calife abbasside al-Mansûr : il s'agit de *L'Introduction arithmétique* de

Nicomaque de Gêrase (II^e siècle) et des *Éléments* d'Euclide. C'est également à cette époque, puis durant les règnes de trois des successeurs d'al-Mansûr, que des ouvrages de philosophie et de logique ont également fait l'objet de traductions. Leur contenu sera parfois d'une grande utilité pour les mathématiciens. C'est donc relativement tôt que les scientifiques, et plus particulièrement les mathématiciens, ont disposé d'outils d'investigation, de justification et de réflexion pour certaines de leurs activités théoriques. Cela n'a pas été sans conséquences sur la pratique mathématique arabe des siècles suivants et sur le regard qu'ont porté d'éminents mathématiciens sur le contenu de leur discipline et sur la manière de la pratiquer.

En ce qui concerne le reste du corpus mathématique ancien qui a été exhumé, traduit, puis étudié, nos informations sont encore fragmentaires. Dans le domaine de la théorie des nombres, en

plus du livre de Nicomaque, d'inspiration néopythagoricienne (et qui bénéficiera de deux traductions), les utilisateurs ont disposé des Livres VII, VIII et IX des *Éléments* d'Euclide. Plus tard, c'est-à-dire vers la fin du IX^e ou le début du X^e siècle, une partie des *Arithmétiques* de l'Alexandrin Diophante (III^e siècle) a été découverte et traduite par Qustâ Ibn Lûqâ. En géométrie, les trois grands domaines de la tradition grecque ont été connus, mais partiellement seulement, par les premiers mathématiciens des pays d'Islam : il s'agit de la géométrie euclidienne – au travers des *Éléments* (traduits au moins trois fois) –, de la géométrie archimédienne – grâce à la traduction de seulement deux ouvrages d'Archimède, *La Mesure du cercle* et *La Sphère et le cylindre* – et de la géométrie des coniques – à travers *Les Coniques* d'Apollonius de Perge (fin du III^e-début du II^e siècle av. J.-C.).

En calcul, les scientifiques arabes ont eu l'embarras du choix : ils ont emprunté

aux Grecs, en l'adaptant, la numération alphabétique à vingt-sept chiffres (neuf lettres de l'alphabet arabe pour les unités, neuf pour les dizaines et neuf autres pour les centaines) et ils l'ont utilisée pour leurs calculs en astronomie. Chez les Indiens, ils ont trouvé la numération décimale positionnelle à dix chiffres (dont le zéro) ainsi que certains algorithmes arithmétiques. Il leur est peut-être parvenu des procédés d'origine chinoise, mais ni les bibliographes arabes ni les mathématiciens ne les évoquent. Comme ces derniers ont toujours eu pour habitude de se référer à leurs prédécesseurs et à leurs écrits, on peut attribuer leur silence, à propos de certaines sources, soit à leur ignorance, soit tout simplement au fait que ces emprunts se sont faits à une date tellement reculée que personne ne pouvait, à l'époque, faire la part entre ce qui était une production mathématique locale et ce qui était le fruit d'une production venue d'ailleurs.

Les contributions arabes

À partir de cet héritage varié mais incomplet, les premiers mathématiciens des pays d'Islam se sont engagés dans des activités multiformes correspondant à deux orientations distinctes. La première était une réponse aux sollicitations de leur environnement socio-économique ou à celles d'autres disciplines scientifiques comme l'astronomie et la physique. La seconde, qui ne correspondait à aucun besoin matériel, est apparue après la lecture et la compréhension du corpus ancien, qui a révélé que certaines questions étaient encore non résolues ou faisaient l'objet d'une résolution jugée non satisfaisante. Ces lectures ont également permis de poser de nouveaux problèmes qui devinrent des éléments d'un programme de recherche.

Les sciences du nombre

Il s'agit de l'arithmétique, plus connue aujourd'hui sous le nom de « théorie des

nombres », ainsi que de la science du calcul. La première s'occupe des propriétés des nombres entiers, la seconde de leur manipulation à l'aide des opérations et de procédures de résolution plus ou moins complexes.

Dans la première discipline, les recherches ont débuté en Orient au IX^e siècle avec l'étude de Thâbit Ibn Qurra sur les nombres amiables, c'est-à-dire des couples de nombres pour lesquels la somme de tous les diviseurs de l'un est égale exactement à l'autre et réciproquement (par exemple, 284 et 220). Elle aboutit à la publication d'une épître dans laquelle il expose un procédé rigoureux permettant de déterminer les couples de nombres en question. Les mathématiciens de l'Occident musulman se sont aussi intéressés à ce problème et l'ont traité dans certains de leurs ouvrages. C'est ainsi qu'au XI^e siècle, dans son *Livre de la perfection*, al-Mu'taman (qui vivait à Saragosse) reproduisit le contenu de l'épître

d'Ibn Qurra. Après lui, au XII^e siècle, le mathématicien de Séville al-Hassâr donna, dans son traité intitulé *Le Livre complet sur la science du nombre*, les deux premiers couples de nombres amiables et la manière de les obtenir. Toujours dans le domaine des nombres premiers, les recherches ont été poursuivies, au XI^e siècle au Caire, par Ibn al-Haytham, qui établit un résultat se rapprochant du théorème des restes (que l'on peut énoncer ainsi : si p est un nombre premier, alors le nombre

$$1 \times 2 \times 3 \times \dots \times (p - 1) + 1$$

est divisible par p). Plus tard, au XIII^e siècle, al-Fârisî fit des recherches sur la décomposition d'un nombre entier en produit de nombres premiers.

La découverte et la traduction partielle des *Arithmétiques* de Diophante ont été à l'origine d'une seconde orientation de la recherche en théorie des nombres. Certains travaux ont concerné la résolution de systèmes d'équations indéterminées. Les

contributions qui nous sont parvenues, qui datent du x^e siècle, sont celles d'Abû Kâmil dans son *Livre des choses rares en calcul* et celles d'al-Karajî dans son livre d'algèbre intitulé *al-Fakhrî*. D'autres recherches ont été consacrées à certaines catégories de nombres, comme les triangles rectangles numériques et les nombres congruents. Parmi les auteurs qui ont étudié ces sujets, citons Abû l-Jûd, al-Khâzin, as-Sijzî, tous trois du x^e siècle, et Ibn al-Haytham, du xi^e. Un troisième sujet a intéressé à la fois les arithméticiens et les géomètres : les suites et les séries numériques finies. Elles constituent des outils intervenant en particulier dans le calcul des aires et des volumes de certaines figures planes ou solides. Leur utilisation dans ce domaine a permis de mieux les connaître et d'établir certains résultats les concernant. Mais les suites ont constitué elles-mêmes des objets d'étude et des chapitres particuliers leur ont été consacrés, par exemple, au xii^e siècle,

par le mathématicien de Marrakech Ibn Mun'im.

La science du calcul ne doit rien ou presque à l'héritage grec : elle a puisé dans un fonds local qui s'est lentement élaboré à partir des différentes pratiques nécessaires aux transactions de toutes sortes et s'est enrichi de procédures provenant d'un fonds très ancien dont l'origine est probablement babylonienne. Mais elle est redevable aussi à la tradition du calcul indien : on y trouve en effet, comme apport original ou d'origine chinoise, un ensemble d'algorithmes arithmétiques ainsi que des procédures de résolution de certains problèmes.

C'est à partir de ces héritages que cette discipline s'est structurée en évoluant. Les dizaines de manuels qui nous sont parvenus montrent que plusieurs traditions ont cohabité avant de se fondre dans un même moule. Jusqu'au XI^e siècle, on faisait la différence entre le calcul indien, qui utilisait les neuf chiffres et le zéro (appelés

« chiffres de poussière »), le calcul des astronomes, qui utilise la numération alphabétique, et le calcul digital et mental, qui, comme son nom l'indique, fonctionne oralement et visuellement. Selon les auteurs et les époques, ce dernier a porté le nom de « calcul arabe », ou de « calcul ouvert », ou encore de « calcul par agrégation et séparation ». À une date qu'il n'est pas possible de préciser, des différences ont commencé à apparaître entre les contenus et les agencements des manuels d'Orient et ceux de l'Occident musulman. On a vu apparaître aussi des changements dans la graphie des chiffres et des fractions avec, en particulier, l'apparition, à partir du XII^e siècle dans des ouvrages maghrébins, de la fameuse barre de fraction. Avec le développement de la science des héritages, un symbolisme particulier a été inventé pour permettre d'écrire tous les types de fractions qui interviennent dans l'expression et le calcul des parts des ayants droit. On a

même observé des différences entre les deux régions de l'Empire musulman dans les valeurs attribuées à certaines lettres dans la numération alphabétique arabe utilisée par les astronomes.

La géométrie

En géométrie, ce sont d'abord les *Éléments* d'Euclide qui ont inspiré de nouvelles études, à partir du IX^e siècle. Elles ont abouti, en particulier, à l'arithmétisation du Livre X de cet ouvrage et ont formé les premiers pas d'une longue tradition se préoccupant essentiellement de l'extension de la notion de nombre, héritée des Grecs. Les mathématiciens des pays d'Islam ont ainsi été amenés à admettre comme nombres les racines carrées de nombres entiers, puis tous les irrationnels obtenus comme racine $n^{\text{ième}}$ d'un entier ou d'une fraction et enfin, dans une dernière étape, tout rapport de deux grandeurs incommensurables, c'est-à-dire dont le rapport des grandeurs est

un irrationnel (par exemple, le rapport du périmètre d'un cercle à son diamètre). Pour arriver à leur but, ces mathématiciens n'ont pas hésité à critiquer certaines définitions d'Euclide et à leur substituer parfois des définitions jugées par eux plus claires et plus opératoires.

La géométrie s'est également orientée, à la même période, vers la résolution de problèmes de mesure et, en particulier, le calcul des aires et des volumes. Les travaux les plus significatifs dans ce domaine ont été ceux de Thâbit Ibn Qurra sur les paraboles, les ellipses et les paraboloides, ceux de son petit-fils Ibrâhîm Ibn Sinân concernant également les paraboles et ceux d'Ibn al-Haytham sur le volume de la sphère et du paraboloides sphérique.

Quant à la géométrie appliquée, une partie de son histoire n'est pas bien connue parce qu'elle se pratiquait, la plupart du temps, dans les corps de métiers où l'enseignement se faisait par initiation directe. Mais l'autre

partie a fait l'objet de témoignages précieux de la part de mathématiciens. Dans le domaine de la décoration, nous avons les informations d'Abû l-Wafâ', qui a publié un ouvrage intitulé *Ce qui est nécessaire à l'artisan en constructions géométriques*, dans lequel il présente les méthodes géométriques des artisans, qu'il compare avec les siennes. En optique, les travaux d'al-Kindî, d'Ibn Sahl, d'Ibn al-Haytham et d'al-Fârisî montrent combien cette discipline était essentiellement géométrique. En architecture et en décoration, en plus d'un fragment anonyme, il nous est parvenu une contribution importante du mathématicien persan al-Kâshî sur la réalisation des coupoles et des *muqarnas* (stalactites). Il y a enfin les nombreux traités écrits par des astronomes, comme ceux d'al-Bîrûnî au XI^e siècle et d'al-Murrâkushî au XIII^e siècle, qui sont consacrés aux aspects géométriques des instruments astronomiques.

Dans le cadre de leurs activités géométriques, certains des mathématiciens de la

tradition arabe ont été amenés à réfléchir sur des problèmes théoriques rencontrés au cours de leur étude des *Éléments* d'Euclide. Ces démarches ont abouti à de nouvelles réflexions et à la rédaction d'ouvrages ou d'épîtres sur les notions de « parallèle » et de « rapport », et sur les outils de démonstration qu'ils avaient eu à utiliser dans leurs travaux de recherche.

Les discussions sur la première notion ont commencé au IX^e siècle et se sont poursuivies jusqu'au XIII^e siècle. Les mathématiciens les plus éminents ont publié des textes sur le sujet. Il s'agit, en particulier, de Thâbit Ibn Qurra au IX^e siècle, d'an-Nayrîzî au X^e, d'Ibn al-Haytham et 'Umar al-Khayyâm au XI^e, de Nasîr ad-Dîn at-Tûsî et Muhyî ad-Dîn al-Maghribî au XIII^e. Comme cela a été établi beaucoup plus tard, ces efforts étaient voués à l'échec, mais ils ont permis de clarifier le problème et de préparer les avancées qui ont eu lieu en Europe avec l'étude des géométries non euclidiennes.

Les travaux sur le concept de rapport ont abouti à des formulations plus satisfaisantes, pour l'époque, des notions de rapports égaux ou inégaux. Ils ont également justifié, *a posteriori*, les initiatives prises par certains mathématiciens pour étendre la notion de nombre. Parmi les auteurs des contributions les plus importantes s'inscrivant dans cette problématique, citons al-Mâhânî, al-Khayyâm et Nasîr ad-Dîn at-Tûsî.

Quant aux réflexions sur les instruments et les objets mathématiques, elles ont connu deux orientations. La première a concerné la définition des concepts d'unité, d'infini et de base numérique. Provoqués par les seuls mathématiciens, les débats qui en ont découlé se sont élargis aux cercles des philosophes et des théologiens. La seconde orientation a concerné l'étude des outils de la démonstration, c'est-à-dire les différentes manières d'établir une propriété ou de justifier la validité d'une construction ou

l'existence de la solution d'une équation. Les travaux connus et analysés sont ceux d'as-Sijzî, d'Ibrâhîm Ibn Sinân et d'Ibn al-Haytham. Les deux premiers traitent des différentes manières d'aborder un problème de géométrie en fonction de sa nature (propriété à établir ou construction à réaliser). Le troisième concerne deux outils importants de la démonstration que les musulmans avaient hérités des Grecs : l'analyse et la synthèse.

L'algèbre

L'analyse du contenu des manuscrits algébriques arabes les plus importants qui nous sont parvenus permet d'avoir une idée sur les progrès essentiels que cette discipline a connus et qui peuvent se résumer ainsi : élargissement du domaine avec apparition de nouveaux outils, intervention de plus en plus grande de ces derniers dans d'autres disciplines comme instruments de résolution de problèmes pratiques ou théoriques,

autonomie progressive vis-à-vis de la science du calcul et de la géométrie.

Le livre d'al-Khwârizmî intitulé *L'Abrégé du calcul par la restauration et la comparaison*, publié entre 813 et 833, est considéré aujourd'hui par les historiens des sciences comme le premier événement dans la longue histoire de l'algèbre. Et nous avons l'impression, à la lecture de certains textes anciens et de témoignages, qu'à la fin du VIII^e siècle la situation était favorable pour de nouvelles initiatives dans différentes branches de la science. Il n'est donc pas étonnant de lire que plusieurs auteurs ont eu l'idée d'écrire un manuel d'algèbre en même temps qu'al-Khwârizmî. D'ailleurs, l'un de ces écrits, celui d'Ibn Turk, qui a été partiellement préservé, confirme ces témoignages. Si d'autres écrits algébriques de la même époque n'ont pas résisté au temps, c'est probablement parce que leur contenu était semblable à celui du livre d'al-Khwârizmî, ce dernier ayant eu, peut-être,

l'avantage décisif d'avoir été choisi par le calife al-Ma'mûn pour être membre de la prestigieuse *Maison de la sagesse* de Bagdad.

Nous ne savons pas si des progrès ont été enregistrés du vivant même de ce mathématicien ou dans les décennies qui ont suivi son décès : les manuels et les commentaires qui ont été publiés à cette époque ont tous été perdus ou bien leur contenu a été intégré dans des ouvrages postérieurs. Le plus ancien traité contenant des nouveautés a été publié par Abû Kâmil à la fin du IX^e siècle. On y trouve l'utilisation de nombres plus « sophistiqués » que les entiers ou les fractions, c'est-à-dire différents types d'irrationnels, ainsi qu'une manipulation beaucoup plus souple des inconnues qui interviennent dans les équations. À partir de la fin du X^e siècle, de nouvelles orientations se dessinent avec, en premier lieu, l'utilisation des polynômes, qui sont soumis à toutes les opérations arithmétiques classiques (qui ne

concernaient auparavant que les nombres et les inconnues). Cela constitua les premiers pas d'un vaste champ appelé plus tard, en Europe, « algèbre des structures ». Les artisans de ces nouvelles investigations sont al-Karajî au XI^e et as-Samaw'al au XII^e. Ensuite apparaît la résolution de nouveaux types d'équations, comme celles que l'on qualifie de « diophantiennes » parce qu'elles sont inspirées de la lecture des *Arithmétiques* de Diophante. Enfin, la théorie géométrique des équations cubiques a permis aux mathématiciens arabes de contourner la difficulté qu'il y avait à résoudre les problèmes du troisième et du quatrième degré par le calcul. Parmi les pionniers de ce nouveau chapitre, on peut citer, au IX^e siècle, al-Mâhânî, au X^e, Abu l-Jûd et, surtout, au XI^e, le fameux poète et philosophe 'Umar al-Khayyâm. Mais il faut préciser que, malgré l'importance théorique de ces avancées, elles ne pouvaient pas toujours satisfaire les utilisateurs des

mathématiques qui travaillaient dans d'autres domaines scientifiques. C'est le cas des astronomes qui ont été amenés à inventer ou à améliorer des techniques d'approximation sophistiquées pour pouvoir calculer les solutions des problèmes qu'ils avaient à résoudre et ne pas se contenter de leur existence. Cela a permis, objectivement, de favoriser l'élaboration d'un nouveau chapitre, celui de l'analyse numérique. Parmi les artisans de ce domaine il y eut, pour l'Orient, Sharaf ad-Dîn at-Tûsî au XII^e siècle et al-Kâshî au XIV^e. De l'Occident musulman, il nous est parvenu des contributions originales, découvertes récemment dans le *Livre de la science du calcul* d'Ibn Mun'im et dans le *Livre du lever du voile sur les opérations du calcul* d'Ibn al-Bannâ. Avec le développement de ces différents chapitres, on a observé une tendance allant dans le sens d'une plus grande autonomie des pratiques algébriques vis-à-vis de la géométrie. Dès

la fin du IX^e siècle, Abû Kâmil ne respectait plus la sacro-sainte règle de l'homogénéité des objets géométriques intervenant dans un problème. Après lui, al-Karajî n'hésita pas à exposer des preuves qu'on qualifierait aujourd'hui d'« algébriques », en plus des démonstrations géométriques jugées nécessaires, à l'époque, pour valider des procédures algébriques. Cette tendance s'est poursuivie avec al-Khayyâm et at-Tûsî, qui ont su exploiter les propriétés des polynômes intervenant dans les équations et qui ont déduit de ces dernières les courbes (paraboles, hyperboles, cercles) utilisées dans leur résolution. Comme aboutissement de ces démarches novatrices, il faut signaler, à la fin du XIII^e siècle, l'initiative du mathématicien maghrébin Ibn al-Bannâ consistant à se débarrasser de toute référence à la géométrie lorsqu'il expose des questions d'algèbre et, en particulier, lorsqu'il démontre l'existence des solutions des équations.

C'est dans le prolongement de ces démarches que l'on doit inscrire l'élaboration d'un nouvel outil, devenu incontournable dans toutes les branches des mathématiques : le symbolisme arithmétique et algébrique. Il faut d'abord remarquer que personne ne revendique cette innovation majeure et que la seule région de l'Empire musulman où l'on a observé son utilisation est le Maghreb, à partir du XII^e siècle. Ce symbolisme apparaît à propos des différentes formes de fractions et des opérations intervenant dans le calcul des héritages, pour s'étendre ensuite au domaine des équations et des polynômes. On ne connaît pas la date précise de l'introduction du symbolisme dans l'enseignement des mathématiques au Maghreb, mais sa présence est constante dans les manuels à partir du XIV^e siècle et jusqu'à la fin du XV^e, comme le confirment les ouvrages d'Ibn Qunfudh, al-Qalasâdî et Ibn Ghâzî.

Les pratiques combinatoires

C'est également dans un ouvrage maghrébin du XII^e siècle que, pour la première fois à notre connaissance dans l'histoire des mathématiques, apparaît un chapitre autonome traitant d'un sujet purement combinatoire. En pays d'Islam, l'origine de ce thème se trouve dans les premières préoccupations linguistiques et métriques, apparues au VIII^e siècle lorsque la langue arabe était devenue le vecteur d'une nouvelle religion et l'expression du pouvoir politique qui gouvernait en son nom. C'est en effet dans les travaux du célèbre linguiste et lexicographe al-Khalîl Ibn Ahmad que sont présentées les premières démarches combinatoires, accompagnées des premiers dénombrements connus dans cette civilisation. Il s'agissait alors de déterminer le nombre de mots que l'on pouvait obtenir avec l'alphabet arabe. Les documents qui nous sont parvenus montrent que d'autres calculs ont été faits

pour tenter de résoudre complètement le problème. Mais il semble que les difficultés théoriques et techniques rencontrées n'ont pas permis d'aboutir. Parallèlement à ces essais infructueux, les mathématiciens ont également rencontré des problèmes qui les ont amenés, naturellement, à énumérer, à dénombrer et à raisonner d'une manière combinatoire, mais, à l'heure actuelle, aucun élément ne nous permet de dire s'ils ont résolu le problème posé par le linguiste du VIII^e siècle. Il a fallu attendre l'avènement d'un nouveau contexte politique et culturel à Marrakech, capitale des Almohades, pour que l'on reprenne les débats et les recherches sur cette question. Cela a abouti à des travaux originaux, entrepris par le mathématicien Ibn Mun'im. Dans son livre intitulé *La Science du calcul*, il consacre un chapitre entier à l'exposé des procédures et des formules qui permettent de dénombrer les mots de n'importe quelle langue. Pour aboutir à ces résultats importants,

il a été amené à construire le triangle arithmétique, un tableau de nombres intervenant dans différents chapitres des mathématiques et qui porte aujourd'hui le nom de « triangle de Pascal ». Il a également établi des résultats intermédiaires qui ont constitué plus tard les premiers outils de l'analyse combinatoire.

La résolution des problèmes posés en langue arabe n'a pas mis un point final aux pratiques combinatoires. Dans la seconde moitié du XIII^e siècle, le mathématicien Ibn al-Bannâ a prolongé les résultats de son prédécesseur en établissant, pour la première fois, un théorème permettant de calculer les combinaisons de n objets p à p sans avoir à construire, à chaque fois, le triangle arithmétique. Il s'agit d'une formule équivalente à celle-ci (avec la convention d'écriture suivante :

$$k! = 1 \times 2 \times 3 \times \dots \times (k - 1) \times k$$

$$C_n^p = \frac{n!}{p! (n - p)!}$$

Après le XIII^e siècle, des auteurs ont continué à se référer à ces résultats et à les utiliser, élargissant de fait leur domaine d'application. On a même cherché à résoudre des problèmes extérieurs aux mathématiques en s'inspirant des démarches nouvelles qui n'avaient pas encore de nom, mais étaient perçues comme différentes de celles qui avaient cours en calcul et en théorie des nombres. C'est le cas, par exemple, du dénombrement de toutes les lectures possibles d'une phrase, compte tenu des règles de la grammaire arabe, ou bien du dénombrement des prières qu'un fidèle doit faire pour compenser l'oubli de certaines d'entre elles, les jours ou les mois précédents.

La trigonométrie

C'est au sein de l'astronomie que les premiers éléments de trigonométrie ont vu le jour, d'abord en Grèce, puis en Inde, avant de faire partie, à partir de

la fin du VIII^e siècle, de la panoplie dont disposaient les astronomes arabes pour exprimer et résoudre leurs problèmes. Le développement de ce domaine a été favorisé par les orientations tant théoriques qu'appliquées des activités astronomiques et géographiques. Les premières ont concerné l'étude du mouvement des planètes et la confection des tables qui leur étaient associées ou qui servaient d'outils, comme les tables donnant les valeurs des principales fonctions trigonométriques. Les secondes ont été une réponse aux sollicitations de l'environnement socio-économique et religieux. Cela s'est concrétisé par le calcul du temps, la détermination des longitudes et des latitudes (en particulier pour obtenir l'orientation des prières vers La Mecque), la conception et l'utilisation d'instruments et la réalisation de nombreuses tables répondant à des besoins précis (calendriers solaire, lunaire, semi-lunaire, heures des prières quotidiennes, etc.).

Les premiers concepts de trigonométrie rencontrés par les astronomes arabes sont celui de la corde de l'angle double, d'origine grecque, ainsi que ceux de sinus et de l'équivalent du cosinus, empruntés à l'Inde. Pour des raisons d'économie, les calculateurs ont progressivement opté pour les outils indiens et ils les ont prolongés par des notions nouvelles, comme celles de tangente et de cotangente. Puis, s'étant familiarisés avec ces outils, ils les ont utilisés pour exprimer tous les résultats hérités des Grecs et pour mener des calculs d'une grande complexité. Parallèlement, ils ont amélioré leur efficacité en réalisant des tables donnant les valeurs des fonctions trigonométriques avec une précision de plus en plus grande. Cela dit, et malgré les efforts des mathématiciens, l'outil principal dans le travail quotidien des astronomes était encore l'incontournable théorème de Ménélaüs, datant du II^e siècle et rencontré pour la première fois dans *L'Almageste* de

Ptolémée sous la forme suivante (voir la figure 1):

$$\frac{\text{corde}(2AE)}{\text{corde}(2EB)} = \frac{\text{corde}(2AF)}{\text{corde}(2FD)} \cdot \frac{\text{corde}(2DC)}{\text{corde}(2CB)}$$

et qui a été « traduite » avec le langage trigonométrique sous la forme :

$$\frac{\sin(AE)}{\sin(EB)} = \frac{\sin(AF)}{\sin(FD)} \cdot \frac{\sin(DC)}{\sin(CB)}$$

Il faut néanmoins signaler un progrès significatif réalisé au cours de la première moitié du x^e siècle et qui a consisté à établir des relations entre les fonctions trigonométriques les plus importantes et à démontrer de nouveaux théorèmes. Mais il a fallu attendre la fin du x^e et le début du xi^e siècle pour que les mathématiciens réussissent enfin à établir le théorème qui a fait la fierté de certains d'entre eux et provoqué une polémique sur sa découverte: le théorème du sinus, baptisé « théorème qui dispense », parce qu'il évitait, enfin, l'utilisation de celui de Ménélaüs. Sa

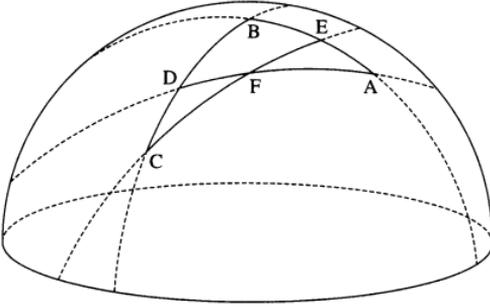


Figure 1 : A, B, C, D, E, F sont les points d'intersection d'arcs de grands cercles tracés sur une sphère.

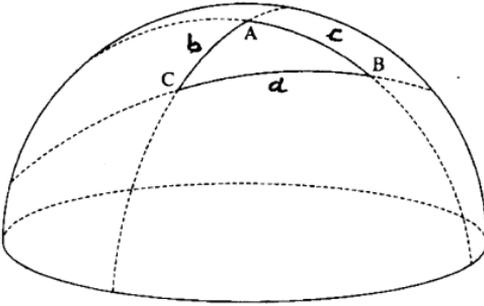


Figure 2.

formulation moderne est la suivante (voir la figure 2):

$$\frac{\sin\hat{A}}{a} = \frac{\sin\hat{B}}{b} = \frac{\sin\hat{C}}{c}$$

où A, B et C sont les angles d'un triangle sphérique dont les côtés a, b et c sont tous des arcs de grands cercles de la sphère en question.

Par sa concision, cette formule permettait un important gain de temps lors du calcul d'un paramètre en fonction de trois autres déjà connus. À la fin du x^e siècle, ce résultat a été établi presque simultanément à Bagdad, par Abû l-Wafâ', et dans l'une des villes d'Asie centrale où travaillaient Ibn 'Irâq et al-Bîrûnî. On le trouve également dans un ouvrage de la même époque écrit en Andalus par Ibn Mu'âdh. C'est également à la fin du x^e siècle que la trigonométrie a commencé à faire l'objet d'un chapitre distinct dans les ouvrages d'astronomie, comme on peut le constater

dans *L'Épître sur les arcs de la sphère* d'Ibn 'Irâq et dans *Le Livre de l'Almageste* d'Abû l-Wafâ'. La dernière étape de ce processus d'autonomisation a eu lieu avec la publication de livres entièrement consacrés aux outils de la trigonométrie. Cela a commencé au XI^e siècle avec *Les Clés de l'astronomie* d'al-Bîrûnî, puis avec *Le Livre des arcs inconnus de la sphère* d'Ibn Mu'âdh et enfin avec le dernier de cette série, *Le Livre de la figure sécante*, de l'astronome et mathématicien Nasîr ad-Dîn at-Tûsî.

L'astronomie ou *la science de la configuration du ciel*

Comparée aux autres sciences, qui sont nées ou se sont développées dans le cadre de la civilisation arabo-islamique entre le VIII^e et le XV^e siècle, l'astronomie apparaît comme celle qui a bénéficié des moyens les plus importants et qui a eu le statut le plus élevé dans la hiérarchie du savoir. Par les questions théoriques qu'elle a étudiées et par les problèmes concrets qu'elle a eu à résoudre, cette science a connu un succès qui ne s'est jamais démenti, que ce soit chez les dirigeants de l'Empire et des différents royaumes, chez les riches mécènes ou dans les couches les plus modestes de la cité

islamique. Il y a au moins trois raisons à ce succès.

La première de ces raisons est de nature culturelle. Dès l'avènement de l'Islam, trois problèmes importants liés à la pratique religieuse (voir plus loin) ont commencé à préoccuper certains fidèles. Les solutions qu'ils avaient alors ayant été jugées non satisfaisantes, ces fidèles se sont tournés vers les premiers astronomes en leur demandant des solutions « scientifiques ».

La deuxième concerne la connaissance de l'avenir des individus, des groupes sociaux et des pouvoirs : l'astronomie est intervenue indirectement dans ce domaine par l'intermédiaire de l'astrologie. Cette dernière repose sur le principe selon lequel le monde sublunaire et tous les êtres vivants qui le composent sont soumis aux effets du mouvement des astres, les astrologues admettant même que la configuration du ciel au moment de la naissance d'une personne détermine son destin. En conséquence,

les mouvements des corps célestes doivent, selon eux, influencer directement ou indirectement sur les événements liés à la vie individuelle ou collective des êtres humains. D'où la nécessité, pour un bon astrologue, de connaître avec la plus grande précision possible le mouvement des astres et leur position à tout moment, c'est-à-dire d'avoir accès à des informations qui constituent l'objet même de l'activité scientifique de l'astronomie. D'ailleurs, les critiques des adversaires de l'astrologie – des théologiens, des historiens et même des philosophes – ne portaient pas sur les aspects mathématiques et astronomiques de cette « science », mais visaient uniquement ses fondements et ses jugements.

La troisième raison est purement scientifique et n'a aucun lien avec des considérations utilitaires : c'est le besoin des hommes de science de chercher des réponses aux questions posées soit par les autres sciences, soit par leur propre discipline au

fur et à mesure que la recherche avance. À cela il faut ajouter une démarche spécifique à l'astronomie : vérifier les paramètres calculés par les prédécesseurs, en les recalculant, et tester les modèles théoriques hérités d'eux. Pour ce faire, les astronomes ont parfois eu besoin d'améliorer des outils mathématiques permettant d'obtenir ou d'expliquer certaines lois qui régissent les mouvements des objets célestes.

Stimulés par ces trois facteurs, les astronomes des pays d'Islam ont d'abord connu une phase d'assimilation et d'étude critique de l'héritage ancien. Les chapitres théoriques qu'ils ont développés concernent la description minutieuse des constellations et les positions des étoiles qui les constituent, avec la réalisation de cartes du ciel, l'élaboration d'outils mathématiques qui seront regroupés dans le chapitre de l'astronomie sphérique, la constitution de modèles planétaires et de tables astronomiques. Mais dans le domaine

de l'astronomie appliquée, sans attendre l'élaboration d'un corpus cohérent, ils ont mené des travaux visant à répondre à des problèmes posés par leur environnement ou à réaliser des programmes commandés par l'État. Ces activités ont fini par se constituer en disciplines, avec leurs techniques propres, leurs ouvrages spécialisés et même leurs communautés respectives. Elles portent sur l'observation du mouvement des corps célestes et de certains phénomènes inhabituels et non cycliques (mais qui n'ont pas fait l'objet d'une étude suivie et systématique), la conception, la fabrication et l'utilisation d'instruments astronomiques, la détermination du temps et l'élaboration des calendriers.

L'astronomie populaire

Avant le phénomène de traduction, qui allait révéler les joyaux du savoir savant des civilisations antérieures à l'Islam, le savoir

astronomique des Arabes se limitait à un ensemble de connaissances constituant ce que l'on appellera plus tard l'« astronomie populaire » : les saisons, les phénomènes météorologiques, le mouvement des étoiles et des planètes, la détermination du temps et le déplacement apparent du Soleil le long de sa trajectoire annuelle ainsi que celui de la Lune. Cette astronomie était à la portée de tous puisqu'elle reposait sur l'observation et sur l'expérience acquise.

Avec l'avènement de l'Islam, la pratique cultuelle amena les fidèles à résoudre des problèmes très difficiles avec le peu de moyens dont ils disposaient : déterminer le moment exact de chacune des cinq prières quotidiennes, connaître la Qibla, c'est-à-dire la direction de La Mecque, et prévoir le jour de la visibilité du croissant de lune. Au cours du premier siècle de l'Islam, les solutions adoptées étaient très approximatives et trahissaient l'absence de toute activité savante. Pour connaître

les heures des prières, on utilisait, dans la journée, la technique du gnomon, c'est-à-dire le déplacement de l'ombre d'une tige fixée, verticalement ou horizontalement, sur une surface plane; la nuit, on se basait sur le déplacement de la lune. Pour déterminer la Qibla, on observait les levers et les couchers de certaines étoiles. Le problème le plus difficile était la détermination du jour de la visibilité du croissant de lune. On se contentait alors d'observer le ciel en comptant sur l'acuité visuelle des observateurs.

La période de traduction

Trois traditions scientifiques préislamiques ont été à l'origine des premiers travaux arabes en astronomie: celles de la Perse, de l'Inde et, surtout, de la Grèce. En ce qui concerne les traductions du persan, le bibliographe du x^e siècle Ibn an-Nadîm cite une quinzaine de noms de traducteurs, sans préciser quelles œuvres ils ont traduites.

Un des textes les plus importants de cette tradition est constitué de tables dites « tables de Shahriyâr ». Quant aux traités indiens, leur traduction a commencé sous le règne du calife abbasside al-Mansûr et sous son impulsion. On ne connaît ni le nombre de ces ouvrages ni tous leurs titres, et les auteurs qui les évoquent restent vagues sur leurs contenus : ainsi, l'astronome andalou du XI^e siècle Sâ'id al-Andalusî nous informe que, parmi les trois écoles indiennes connues, seule celle du *Sindhind* est parvenue aux Arabes. Parmi les ouvrages de cette tradition, on peut citer un écrit du VI^e siècle, l'*Arybhatiya* d'Aryabhata, un autre du VII^e, le *Khanakhadyaka* de Brahmagupta, qui est peut-être celui que le calife al-Mansûr a ordonné de traduire, ainsi que le *Karana-Tilaka* de Bijayandin, du X^e siècle, qui a été traduit par al-Bîrûnî au début du XI^e siècle.

D'après les références des astronomes qui ont utilisé ces sources, on sait que l'on y trouve les premiers outils trigonométriques,

comme la notion de sinus d'un angle, préférée par les calculateurs des pays d'Islam à la notion de corde de l'angle double utilisée par les Grecs, ainsi que de petites tables donnant les valeurs des sinus de certains angles. On y trouve également les algorithmes de calcul de certains paramètres qui permettent la confection des tables astronomiques ainsi que des procédés de mesure.

Pour la partie du patrimoine astronomique grec qui a été traduite en arabe, les informations sont plus nombreuses et plus précises, à la fois sur le contenu, sur les traducteurs et parfois même sur les différentes traductions ou corrections d'un même ouvrage. Nous savons ainsi que le plus important traité astronomique grec, *L'Almageste* de Ptolémée, qui date du II^e siècle, a d'abord été traduit du syriaque vers le milieu du VIII^e siècle avant de l'être à partir du grec. On a d'ailleurs recensé au moins trois traductions en arabe depuis sa

langue d'origine. Deux d'entre elles nous sont parvenues, datant toutes deux du IX^e siècle : celle d'al-Hajjâj et celle d'Ishâq Ibn Hunayn, cette dernière ayant bénéficié d'une révision par le grand mathématicien Thâbit Ibn Qurra. D'autres livres de Ptolémée ont également été traduits, comme *Le Livre des hypothèses* et le *Planisphærium*. Il faut également signaler un ensemble d'ouvrages géométriques indispensables aux astronomes, comme *Les Sphériques* de Ménélaüs, du II^e siècle, *La Sphère mobile* d'Autolykos, du III^e siècle av. J.-C., et des manuels décrivant des instruments astronomiques, comme *La Sphère armillaire* de Théon d'Alexandrie, du IV^e siècle.

Malgré les interdits que nous avons déjà évoqués, les livres astrologiques anciens ont été très recherchés par les traducteurs arabes. C'est la tradition grecque qui en a fourni le plus grand nombre : parmi les auteurs dont les écrits ont été traduits, on

peut citer Dorotheos, qui vécut au 1^{er} siècle av. J.-C., Valens et Hermes, antérieurs au 4^e siècle, ainsi que Ptolémée. Certains textes étaient d'ailleurs attribués à Platon ou Aristote. Une vingtaine d'ouvrages indiens ont également été traduits, dont certains avaient été écrits par des astronomes célèbres, comme Kanaka. La tradition persane a également fourni des textes dont les plus prisés étaient ceux de Zarathoustra et de Jamasb. La quatrième tradition astrologique est celle des Babyloniens. Pour des raisons géographiques évidentes, c'était celle qui était la plus pratiquée dans la région avant l'avènement de l'Islam, et ses ouvrages circulaient encore au 7^e siècle, comme le confirme le traducteur Ibn Wahshiya, au 9^e siècle, à propos de l'ouvrage le plus célèbre et le plus imposant, celui de Dahwanây, sur lequel il porte le jugement suivant : « C'est un livre précieux dont le statut et la valeur sont immenses. Je ne l'ai pas traduit en entier

mais [seulement] la première partie, car il comprenait environ deux mille feuillets. »

Les débuts de l'astronomie arabe

Comme pour les autres disciplines scientifiques arabes, nous avons très peu d'informations sur les conditions dans lesquelles sont apparues les premières activités astronomiques inspirées par les traductions que nous venons d'évoquer. Mais quelques noms de pionniers nous sont parvenus ainsi que certains aspects de leur production. Dans le domaine des instruments astronomiques, on peut citer, au VIII^e siècle, Muhammad al-Fazârî, qui écrivit un ouvrage sur un instrument appelé « sphère armillaire » et un autre sur l'utilisation de l'astrolabe. Après lui, le célèbre astrologue Mâshâ'allâh a publié un livre sur les procédés de construction et d'utilisation de ce même instrument.

Dans le domaine théorique, c'est d'abord l'étude et l'application des techniques et

des conceptions indiennes qui ont dominé durant le dernier tiers du VIII^e siècle : après une période d'assimilation du contenu du *Sindhind*, les astronomes arabes ont publié une série de tables astronomiques, comme *Les Tables selon le calendrier arabe* d'al-Fazârî, *Les Tables du Sindhind calculées de degré en degré* de Ya'qûb Ibn Târiq ou *Les Tables subtiles* de Jâbir Ibn Hayyân. L'un des représentants éminents de cette « école indienne » est al-Khwârizmî, plus connu, aujourd'hui, comme l'auteur du premier livre d'algèbre. Dès le IX^e siècle, et parallèlement à la tradition indienne, on voit se constituer une puissante tradition grecque à partir de l'étude de *L'Almageste* de Ptolémée. Parmi les savants du IX^e siècle qui ont mis le contenu de cet ouvrage à la portée des étudiants et l'ont enrichi de leurs corrections et de leurs propres contributions, on peut citer an-Nahâwandî, al-Farghânî, Thâbit Ibn Qurra et Ibn 'Isma. Malheureusement, aucun de ces

ouvrages ne nous est parvenu. D'autres traités grecs ont également été introduits dans le programme de formation des futurs astronomes, comme ceux de Ménélaüs et de Théodose que nous avons déjà évoqués.

C'est également au IX^e siècle que se développe la pratique savante de l'observation et de la mesure. Les premiers travaux dans ces domaines ont été réalisés à la demande du calife abbasside al-Ma'mûn, dans l'objectif de vérifier tous les paramètres hérités des Grecs. Parmi les tâches assignées à l'équipe d'astronomes recrutés par l'État, il y avait la détermination de l'inclinaison de l'écliptique, de la longueur d'un méridien et de la précession des équinoxes. Parallèlement, des recherches ont été amorcées pour tenter de résoudre les trois problèmes de la pratique religieuse musulmane. Parmi les auteurs qui se sont penchés sur la question du croissant de lune, on compte des mathématiciens prestigieux comme les frères Banû Mûsâ

et Thâbit Ibn Qurra. Un astronome, Ibn 'Isma, a même conçu un instrument fournissant une solution mécanique au problème. Pour la détermination de la direction de La Mecque, on connaît les contributions d'ad-Dinawârî et de Habash al-Hâsib, datant du IX^e siècle. Le calcul des moments des prières quotidiennes à l'aide des nouveaux outils trigonométriques a été réalisé par al-Khwârizmî.

Quant à l'activité astrologique, c'est au VIII^e siècle, en particulier sous l'impulsion des califes abbassides et en liaison avec les activités astronomiques, que se développe une véritable tradition arabe dans ce domaine, avec des astrologues officiels rétribués par les califes. Certains d'entre eux ont d'ailleurs été consultés par al-Mansûr pour le choix de l'emplacement de la nouvelle capitale, Bagdad, construite en 762. Hârûn ar-Rashîd avait également des astrologues attitrés, comme al-Fadl Ibn Sahl. Parmi les astronomes qui ont

publié des livres d'astrologie durant ce même siècle, on peut citer al-Fazârî et Ya'qûb Ibn Târiq. Mais il y eut également des auteurs spécialisés dans ce domaine, comme Mâshâ'allâh, qui est l'auteur de plus de vingt livres sur le sujet, ou 'Umar Ibn al-Farrukhân et Ibn an-Nawbakht, qui ont rédigé chacun une dizaine d'ouvrages.

L'astronomie théorique _____

L'astronomie théorique arabe englobe non seulement les travaux concernant la réalisation des tables astronomiques, mais aussi l'ensemble des contributions relatives au mouvement des objets célestes et à l'élaboration des modèles planétaires expliquant ces mouvements. Dans ces deux grandes activités, le recours aux outils mathématiques a été constant. Pour simplifier, on peut classer ces derniers en deux catégories : des outils essentiellement grecs comme la géométrie plane et sphérique

et la géométrie des coniques; et ceux qui, à partir d'un héritage indo-babylonien, ont été perfectionnés et parfois même créés pour répondre aux besoins de l'astronomie. Cette seconde catégorie concerne en particulier certains outils arithmétiques, algébriques et trigonométriques.

Les tables astronomiques

Les tables astronomiques se divisent en deux grands groupes: le premier concerne les problèmes pratiques liés à la vie dans la cité islamique du Moyen Âge, comme l'établissement des calendriers et, ainsi que nous l'avons déjà mentionné, la détermination de la Qibla et de la date de la visibilité du croissant de lune; le second regroupe des tables qui servent aux astronomes dans leurs activités quotidiennes, comme les tables trigonométriques et des tables plus spécialisées servant à déterminer l'équation du temps, les mouvements moyens des planètes et les paramètres liés aux éclipses.

Certaines de ces tables sont publiées d'une manière indépendante, tandis que d'autres sont regroupées dans des ouvrages appelés *zîj*. Avec le développement de l'astronomie, on observe un accroissement significatif du nombre de ces tables répondant à des usages variés et, dans le même temps, on constate que la précision des calculs est allée en grandissant. Cela a été rendu possible grâce au progrès de l'algèbre et au perfectionnement des algorithmes d'approximation. Parmi ces tables, on peut citer celles d'Ibn Yûnus relatives à l'équation de la lune et qui fournissent 30 000 valeurs du paramètre, ou celles d'Ulug Beg qui en fournissent plus de 170 000, ainsi que celles qui servaient à déterminer les éclipses ou celles qui donnaient la parallaxe de la lune et du soleil. Il faut enfin signaler d'autres tables qui ne sont pas dans les *zîj* et qui sont des instruments indispensables pour effectuer différents calculs ou pour réaliser certains instruments comme des tables de

multiplication sexagésimales et celles qui servaient à effectuer le tracé de certaines lignes sur l'astrolabe.

Les modèles planétaires

Pour comprendre la nature des tentatives des astronomes des pays d'Islam pour élaborer de nouvelles explications des mouvements apparents des planètes, il faut rappeler brièvement le contenu des modèles planétaires qu'ils avaient hérité des Grecs par l'intermédiaire des travaux de Ptolémée. Ce dernier et ses prédécesseurs considéraient que les objets célestes se déplaçaient selon deux mouvements circulaires uniformes : un mouvement céleste global, d'est en ouest, et un mouvement en sens inverse, propre à chaque objet. Mais l'observation avait révélé deux phénomènes qui contredisaient cet agencement : le mouvement des planètes, qui ne semble pas uniforme, et les trajectoires apparentes de certaines d'entre elles, qui ne sont pas circulaires et ne se font

pas toujours dans le même sens, puisqu'on constate des ralentissements, des arrêts et des changements d'orientation.

Pour contourner cette difficulté, Ptolémée avait élaboré une explication basée sur deux cercles mobiles, l'« excentrique » et l'« épicycle ». La combinaison des deux mouvements permettait de représenter correctement les phénomènes : l'excentrique n'étant pas centré sur la Terre, le mouvement d'une planète paraît plus rapide ou plus lent suivant qu'elle est plus proche ou plus éloignée de l'observateur. D'autre part, comme la vitesse est supposée être plus grande sur l'épicycle que sur l'excentrique, lorsque la planète se déplace sur son épicycle, sa vitesse apparente et son déplacement sont modifiés de la manière suivante : en A, les vitesses des deux cercles s'additionnent et, en B, elles se retranchent. De plus, à partir de la Terre, on voit la planète s'immobiliser aux points C et D, puis rebrousser chemin (voir la figure 3).

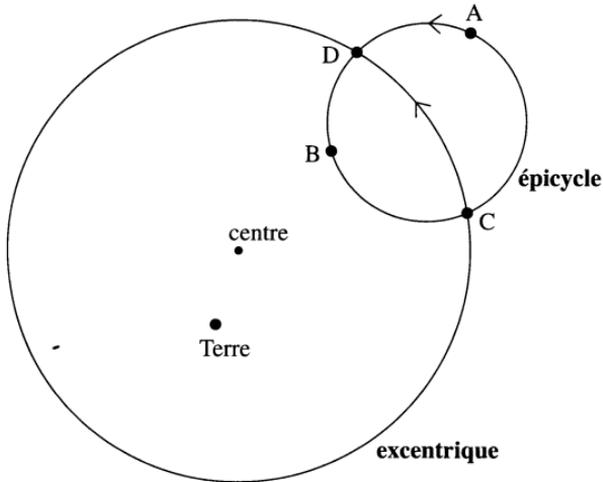


Figure 3.

C'est dans deux ouvrages de Ptolémée, *L'Almageste* et *Le Livre des hypothèses*, que les premiers astronomes musulmans ont découvert cette modélisation des mouvements des planètes. Ils l'ont adoptée et utilisée au cours des deux siècles suivants. Mais, au début du XI^e siècle, des critiques ont commencé à se faire entendre. Puis des astronomes, des philosophes et des mathématiciens se sont penchés sur la question pour tenter de trouver une solution

de substitution. L'un des premiers savants connus ayant commencé à s'interroger sur les modèles grecs est Ibn al-Haytham. Son argument majeur, exposé dans son ouvrage intitulé *Les Doutes sur Ptolémée*, repose sur la constatation que les modèles de ce dernier sont purement théoriques et n'ont aucune existence physique. Comme il était convaincu, disait-il, qu'il était possible d'élaborer des modèles représentant les mouvements réels des planètes, il a entrepris des recherches dans ce sens, sans aboutir à des résultats. Mais il a eu le mérite de soulever le problème et d'indiquer de nouvelles voies de recherche. D'ailleurs son initiative n'est pas restée lettre morte puisque de nouvelles critiques ont été formulées et des solutions inédites ont été cherchées.

En Andalus, à la fin du XI^e siècle, c'est Ibn Bâjja, un philosophe expert en astronomie et en mathématiques qui, après avoir étudié l'argumentation d'Ibn al-Haytham,

a exprimé des idées nouvelles sur le mouvement des planètes. Il aurait ainsi élaboré un modèle basé sur l'excentrique, mais qui ne faisait pas intervenir d'épicycle. Comme à son habitude, il n'a pas eu le temps de rédiger le détail de ses idées, qui nous sont parvenues à travers des témoignages, comme celui de Maïmonide. Après lui, les recherches ont été poursuivies par des philosophes, mais ayant de solides connaissances en astronomie et en mathématiques, et il semble que des solutions aient été entrevues, en particulier, au XII^e siècle, par Ibn Tufayl, qui aurait réussi à concevoir un système ne faisant intervenir ni les épicycles ni les excentriques. Mais nous n'avons aucune information sur son contenu. Un autre témoignage, plus explicite, évoque les tentatives d'Ibn Rushd, le grand commentateur d'Aristote, qui aurait suggéré d'introduire le mouvement hélicoïdal dans l'élaboration des modèles. Il est intéressant de noter que, à la suite d'Ibn

al-Haytham, les différentes argumentations de ses successeurs d'al-Andalus que nous venons d'évoquer brièvement ne sont pas astronomiques ou mathématiques, mais purement philosophiques. En effet, c'est au nom des principes de la physique aristotélicienne que les modèles de Ptolémée sont rejetés.

Il y a eu également les tentatives des astronomes. Au XIII^e siècle, l'Andalou al-Bitrûjî a repris l'idée d'Ibn Rushd et l'a introduite dans ses représentations des mouvements des planètes. Mais, à notre connaissance, les contributions les plus significatives ont été élaborées en Orient. C'est dans *Le Livre du rappel* qu'at-Tûsî a proposé un nouveau modèle faisant intervenir deux cercles tangents intérieurement, devenus célèbres sous le nom de « couple d'at-Tûsî ». Le rayon du cercle extérieur est le double de celui de l'autre; le cercle intérieur tourne dans le sens contraire du premier et à une

vitesse double. Cette idée de base a été de nouveau utilisée par d'autres astronomes contemporains d'at-Tûsî, comme al-'Urdî et ash-Shirâzî, qui travaillaient avec lui dans l'observatoire de Maragha, ou comme Ibn ash-Shâtir, qui était *Muwaqqit* à Damas, c'est-à-dire chargé, dans la mosquée omeyyade, de déterminer les moments des prières.

_____ L'astronomie appliquée

À partir du x^e siècle, les activités pratiques de l'astronomie arabe ont poursuivi leur développement en suivant les grandes orientations apparues au ix^e siècle, mais en profitant encore davantage des progrès de l'astronomie théorique, de l'élaboration de nouveaux outils mathématiques (comme l'algèbre et la trigonométrie) et du perfectionnement des instruments de mesure. Mais avant d'aborder les différents aspects de cette astronomie appliquée,

il faut insister sur le caractère étendu de cette pratique scientifique qui n'était pas réservée à quelques individus résidant à Bagdad, la capitale de l'Empire musulman : on observe au contraire la présence de cette activité dans toutes les villes moyennes d'Orient et d'Occident, ce qui signifie une diffusion relativement importante de l'astronomie dans certaines couches de la société. Or cela n'est pas concevable sans une extension de l'instruction et sans un relèvement significatif du niveau culturel de franges importantes de la population des villes.

L'observation astronomique

En pays d'Islam, l'observation a concerné essentiellement les phénomènes cycliques et ceux qui pouvaient se prévoir par le calcul. Il est rare en effet que des spécialistes aient évoqué des événements célestes exceptionnels. Les informations les concernant se trouvent plutôt dans des

ouvrages historiques ou littéraires. Au niveau de la démarche générale, on constate aussi que les observations n'ont pas eu pour fonction de vérifier la validité de théories nouvelles. On a donc scruté le ciel d'abord pour le décrire convenablement, puis pour y faire des mesures. Sans entrer dans le détail, on peut dire que ces activités ont souvent été menées individuellement, jusqu'au moment où les conditions financières et l'importance du programme d'observation ont nécessité la construction d'observatoires. Dès le IX^e siècle, on a observé des éclipses de Lune et de Soleil, et on a vérifié les positions des planètes visibles. Samarra et Damas sont signalées comme ayant été des lieux d'observation alors qu'elles n'ont pas de montagnes dans leurs environs. Il n'y a pas non plus de montagne au Caire, mais cela n'a pas empêché Ibn Yûnus, au X^e siècle, d'observer le ciel en se contentant d'une colline appelée mont Muqattam. À la même époque, à Chirâz, l'astronome as-Sûfi a été

amené à faire de nombreuses observations avant de réaliser son globe céleste où les constellations et les étoiles sont disposées avec une grande précision. À la fin du x^e siècle, une expérience originale a eu lieu grâce à la coopération de deux savants bien connus, Abû l-Wafâ'et al-Bîrûnî. Ils ont observé l'éclipse de Lune du 24 mai 997, le premier depuis Bagdad et le second depuis Kath, en Asie centrale, et ils ont pu ainsi calculer la différence de longitude entre les deux villes. Il semble qu'en Occident musulman les observations aient été moins nombreuses. C'est du moins ce qui se dégage à la lecture des sources disponibles, qui évoquent seulement deux sites d'observation : la ville de Séville et la Sicile.

À partir du xiii^e siècle, des lieux d'observation dignes de ce nom voient le jour, mais dans des circonstances particulières. Il s'agit de véritables observatoires avec des bâtiments, des instruments de grande

dimension, une bibliothèque et un atelier pour la fabrication d'instruments. Le premier de ces établissements a été construit à Maragha, en Iran, sur ordre du chef mongol Hulagu, une année après son entrée victorieuse à Bagdad, en 1258. Autour de son directeur Nasîr ad-Dîn at-Tûsî, l'observatoire a réuni les meilleurs astronomes de l'époque, parmi lesquels on peut citer ash-Shirâzî, al-Maghribî et al-'Urdî. On signale même, dans cette équipe, un astronome chinois du nom de Fu Meng Chi. D'après le témoignage d'al-'Urdî, des dizaines d'instruments ont été fabriqués par des artisans spécialisés, certains étant des prototypes conçus par lui. C'est également dans cet observatoire que de nombreuses mesures ont été effectuées. Le second observatoire important a été construit à Samarkand en 1420, avec un financement du prince Ulug Beg, petit-fils de Tamerlan et excellent astronome. Il a été dirigé par le mathématicien al-Kâshî et

a fonctionné une trentaine d'années. Au XVI^e siècle, c'est au tour d'Istanbul d'avoir un établissement de ce type, inauguré en 1575 et dirigé par Ibn Ma'rûf, qui avait une cinquantaine de collaborateurs. Mais il n'a fonctionné que pendant trois ans : sous la pression de la plus haute autorité religieuse de l'époque et d'une partie de l'opinion publique, le sultan a fini par ordonner sa démolition. Quant aux derniers observatoires, construits à partir de la fin du XVII^e siècle à Delhi, Bénarès et Jaipûr, ce sont plutôt des réalisations de prestige, leurs propriétaires, des maharajas de la famille Jai Singh, pratiquant l'astronomie en amateurs passionnés et non en professionnels.

Les instruments astronomiques

Dans le domaine de l'astronomie arabe appliquée, les instruments occupent une place de choix à la fois par leur nombre, par la diversité de leurs fonctions et par leur

présence dans la vie de la cité. Les concepts qui sont à la base des premiers instruments astronomiques sont d'origine grecque. L'apport arabe a consisté à réactiver cet aspect de la technologie, puis à y introduire des innovations importantes tout au long des premiers siècles de la nouvelle civilisation. Ces innovations répondaient soit à un souci d'optimisation des outils, soit à des besoins nouveaux apparus avec le développement de la société ou avec la diversification des activités scientifiques. On a ainsi recensé des dizaines d'instruments plus ou moins sophistiqués. Certains ont connu un usage intensif, d'autres n'ont servi que dans les observatoires, peu nombreux, qui ont fonctionné, d'autres encore sont le résultat de prouesses techniques témoignant de l'esprit inventif de leurs auteurs.

Une première catégorie d'instruments a servi à faire des mesures du temps, des grandeurs et des distances – c'est le cas des différents types d'astrolabes. La seconde

catégorie permettait de réaliser des calculs – c'est le cas du cadran sinus, à l'aide duquel on détermine les solutions numériques de certains problèmes trigonométriques.

La première phase de l'histoire de l'instrumentation astronomique arabe a consisté à récupérer des informations sur ce qui avait été conçu par les Grecs ; puis les artisans se sont mis à réaliser matériellement ce qui était décrit dans les documents retrouvés, comme la sphère armillaire, l'astrolabe sphérique et l'astrolabe planisphérique. On est ensuite passé à une phase de perfectionnement des anciens modèles. Il semble que, dans ce domaine, la création ait d'abord été stimulée par les besoins propres à l'activité astronomique avant de répondre à ceux de « consommateurs » comme les arpenteurs, les marchands ou les astrologues.

L'instrument le plus représentatif de l'astronomie arabe est incontestablement l'astrolabe. Son principe est basé sur la

projection stéréographique ayant pour centre le pôle Sud (voir la figure 4). Cette projection a l'avantage de conserver les angles, qui permettent de mesurer les distances entre des objets dans le ciel. Elle conserve aussi la forme des trajectoires

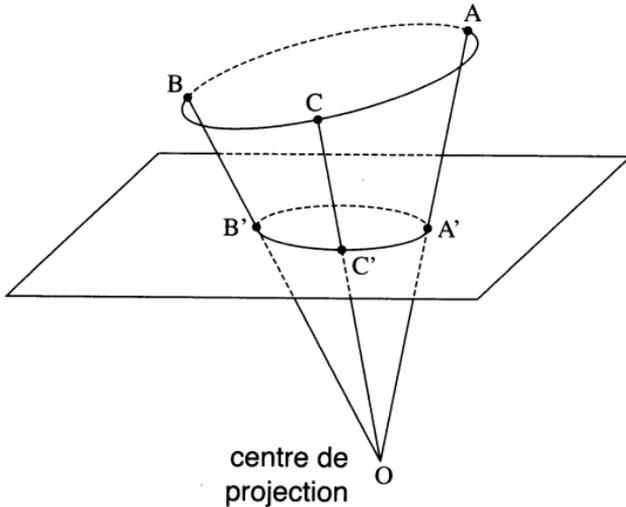


Figure 4 : Le centre de projection O est le pôle Sud céleste. Le plan de projection correspond à la face de l'astrolabe sur laquelle seront donc représentées les projections (A', B', C', ...) d'un certain nombre d'étoiles fixes (A, B, C,...). Si le cercle (ABC) est la trajectoire annuelle du Soleil dans le ciel (dans son mouvement apparent), sa projection sur le plan de l'astrolabe sera donc un cercle.

circulaires qui sont projetées, en général, selon des cercles. Grâce à ses multiples graduations et à la possibilité de positionner correctement, à n'importe quel moment, les étoiles les plus importantes de l'hémisphère Nord, l'instrument permet de faire des mesures et, en particulier, de déterminer la position d'un astre ou d'obtenir l'heure exacte en un lieu donné. Avec les éléments tracés sur le dos de l'astrolabe, l'arpenteur peut effectuer certaines mesures, comme le calcul de la hauteur d'un édifice ou d'une montagne, la profondeur d'un puits ou la largeur d'une étendue qu'il n'est pas possible de parcourir.

Cet instrument s'est répandu dans l'Empire et ses usages se sont multipliés, aussi a-t-on tenté, à différentes époques, d'y introduire des améliorations dans le but de le rendre moins encombrant ou de lui ajouter de nouvelles fonctions. C'est ainsi qu'au XI^e siècle l'astronome de Tolède Ibn Khalaf inventa le principe de l'astrolabe universel.

Son souci et celui de tous les utilisateurs qui avaient à se déplacer dans l'immensité du territoire musulman étaient d'alléger l'astrolabe classique. Or l'utilisation de ce dernier variait selon la latitude du lieu où se faisaient les mesures, chaque latitude étant représentée par la face (ou le dos) d'une plaque métallique; si l'on voulait utiliser l'instrument pour huit latitudes, il fallait donc transporter quatre de ces plaques. Cette contrainte provenait du fait que la projection utilisée pour représenter le ciel sur l'astrolabe utilise le pôle Sud pour centre de projection. L'idée d'Ibn Khalaf a été de prendre comme centre le point vernal (une des extrémités de l'intersection du plan de l'écliptique avec le plan de l'équateur). De cette manière, on n'avait plus besoin de plaques et l'instrument en était allégé d'autant. Ce principe ayant été adopté, il y eut d'autres améliorations attribuées à l'Andalou az-Zarqâlî et à Ibn as-Sarrâj, qui travaillait en Orient. Dans la lancée,

on a également conçu un astrolabe-cadran qui correspondait au quart d'un astrolabe ordinaire, mais qui rendait les mêmes services. Puis on a appliqué ce principe à l'astrolabe universel. Une dernière innovation visant à alléger l'instrument au maximum est attribuée au mathématicien sharaf ad-Dîn at-Tûsî, qui a imaginé une sorte d'astrolabe-stylo appelé « bâton d'at-Tûsî », consistant en une simple tige munie de deux ficelles.

Une seconde orientation dans les innovations technologiques a consisté à répondre aux besoins des astronomes eux-mêmes. On a ainsi eu l'idée, probablement pour des raisons pédagogiques, de réaliser des astrolabes mobiles reproduisant les déplacements du Soleil et de la Lune. On a aussi automatisé le calcul du temps en fabriquant des « horloges astrolabiques », appelées ainsi parce qu'on les obtenait en ajoutant un mécanisme à l'astrolabe. Pour optimiser les calculs, des instruments

pouvant fournir des résultats par simple manipulation ont été réalisés. C'est ainsi qu'ont été inventés différents types de quadrants permettant de résoudre des problèmes numériques ou trigonométriques sans réutiliser chaque fois les formules et donc sans calcul.

Il reste à dire quelques mots sur un instrument très utilisé dans le cadre des pratiques religieuses, parce qu'il permettait de connaître les moments des prières : le cadran solaire. Il est basé sur le principe très simple du gnomon que nous avons déjà évoqué : l'allongement de l'ombre d'une tige. L'étude théorique de cet instrument montre que, lorsque l'extrémité de l'ombre de la tige se déplace sur un plan, elle parcourt une courbe géométrique, dite « hyperbole », dont le tracé dépend de la latitude du lieu où l'instrument est utilisé. Il suffit de tracer cette courbe avec précision et de la graduer pour disposer d'une horloge solaire beaucoup plus précise que les traditionnels

gnomons. Selon les besoins, les cadrans étaient horizontaux, verticaux ou inclinés. Ces instruments, réalisés en marbre, étaient fixés sur les murs des mosquées. Mais on a également conçu des cadrans portatifs très légers, qui alliaient la précision à l'esthétique : coniques ou cylindriques, ils étaient joliment décorés. Des cadrans universels, opérationnels sous n'importe quelle latitude, furent même réalisés.

La géographie ou *la science de la configuration de la Terre*

Dans la tradition scientifique arabe, la géographie englobe trois domaines distincts : la géographie descriptive, les relations de voyage et la cartographie. Les deux premiers se rattachent à ce que l'on appelle aujourd'hui la géographie humaine : il s'agit de l'ensemble des informations que l'on peut rassembler sur les populations, leurs espaces et leurs modes de vie, leurs habitations, leurs activités économiques, leurs croyances, etc. Le troisième domaine, plus technique que les deux autres, trouve son origine dans les travaux grecs traduits au IX^e siècle. Il s'agit du calcul des distances, de l'orientation sur terre et sur mer, de la

détermination des latitudes et des longitudes et de leur utilisation pour la réalisation de différents types de cartes. C'est ce chapitre qui entre dans le cadre de ce livre, mais il est nécessaire d'évoquer les deux autres pour donner une vision globale de cette discipline qui n'a pas encore révélé tous ses apports dans le cadre de la civilisation arabo-musulmane.

La géographie humaine _____

Cette partie de la géographie a été, au départ, une réponse aux besoins de l'État puis à ceux des marchands. En effet, après la phase de conquête qui s'est achevée vers 750, l'immense territoire contrôlé par le pouvoir musulman fut géré, dans un premier temps, d'une manière centralisée, depuis Bagdad. Il était donc impératif de disposer de différents types d'informations sur les pays soumis, sur leurs populations et sur leurs activités économiques. Il est

d'ailleurs significatif de constater que le premier « géographe » de l'Empire, qui vivait au IX^e siècle, était fils de gouverneur et qu'il a exercé la fonction importante de chef du service de la Poste, c'est-à-dire d'une structure ayant aussi pour vocation de récolter l'information et de superviser les services de renseignements de l'État central : il s'agit d'Ibn Khurdâdhbeh, un lettré qui, après avoir longtemps voyagé, a publié, en 846, un ouvrage intitulé *Le Livre des routes et des royaumes*. Ce fut le début d'une longue tradition de géographie dont les préoccupations et les activités s'inscrivent essentiellement dans trois grands thèmes. Le premier comprend la description des terres, des rivières, des mers et des îles, en tenant compte de la division du monde habité (héritée des Grecs) en sept « climats » et en donnant les coordonnées des villes. Le deuxième complète le premier dans la mesure où il concerne les itinéraires et les distances approximatives, les lieux

stratégiques comme les frontières, ainsi que des éléments de la vie économique. Le dernier thème, plus littéraire, traite de tout ce qui est « attrayant », c'est-à-dire des aspects historiques des lieux décrits, des légendes qui leur sont associées, des éléments curieux ou extraordinaires qu'ils contiennent. Les ouvrages les plus représentatifs de cette discipline, qui datent tous du x^e siècle, ont été *Le Livre de la disposition des pays* d'al-Balkhî, *Le Livre des configurations des climats* d'al-Istakhrî, *Le Livre des routes et des royaumes* d'Ibn Hawqal et *Le Livre de la meilleure répartition pour la connaissance des provinces* d'al-Muqaddasî. La tendance générale de ces ouvrages a été de centrer la géographie sur le territoire de l'Islam. Cela se voit à la fois dans les thèmes traités et dans les cartes qui accompagnent les textes ou qui les illustrent.

Comme ce territoire était entouré de mers et d'océans, il n'est pas étonnant

que la géographie arabe se soit enrichie, relativement tôt, de relations de voyages contenant de précieuses informations à la fois sur les côtes de l'Empire et sur les pays limitrophes qui entretenaient des liens commerciaux avec lui. Vers le milieu du IX^e siècle, un auteur anonyme publia un livre intitulé *Informations sur la Chine et l'Inde*, premier d'une série d'ouvrages écrits avant le X^e siècle qui contenaient soit des descriptions des côtes de l'océan Indien et de la mer de Chine, soit des informations sur les routes maritimes. Parmi ces écrits, on peut citer *Les Merveilles de la mer* d'un anonyme du X^e siècle, *L'Abrégé des merveilles* de Wâsif Shâh et plusieurs ouvrages portant un même titre, *Le Livre de la route*, publiés aux XI^e et XII^e siècles. Nous n'avons pas d'informations précises sur d'éventuelles publications au cours des deux siècles suivants et il faut attendre le début du XV^e siècle pour observer une réactivation de cette littérature de la mer qui sera plus technique que celle de la période

antérieure. Ce sont d'ailleurs des marins prestigieux, comme Ibn Mâjid et al-Mahrî, qui ont publié ces *Traités nautiques*, résultats de la combinaison de leurs connaissances livresques tirées d'ouvrages antérieurs et de leur longue expérience de navigateurs hors pair.

À partir du XI^e siècle, les changements au niveau politique (disparition du califat de Cordoue, affaiblissement du pouvoir central à Bagdad, antagonisme violent entre lui et le califat fatimide du Caire, renouveau politique du Maghreb) ont eu des effets sur le contenu et les orientations de la géographie arabe. L'Empire ayant éclaté politiquement et ses territoires étant désormais soumis à la menace extérieure, la vision du monde s'élargit de nouveau chez les géographes et l'on revint à la description de toutes les terres habitées. C'est également la période où l'Occident musulman produisit des œuvres de haut niveau dans ce domaine. Il s'agit, pour l'Andalus,

des traités d'al-Bakrî au XI^e siècle, d'az-Zuhrî au XII^e et d'Ibn Sa'îd au XIII^e. Pour le Maghreb, au XII^e siècle, la figure dominante est al-Idrîsî, originaire de Ceuta, mais qui n'y a pas travaillé longtemps puisqu'il a été essentiellement au service du roi Roger II de Sicile, qui régna de 1130 à 1154; la mise au point de sa carte du monde a demandé quinze ans de travail et nécessité la mise sur pied d'un important programme de collecte de l'information faite par une équipe de collaborateurs dans différents endroits de la terre habitée, y compris dans les territoires non musulmans. Cette carte a été réalisée selon deux formats : le premier, qui nous est parvenu, est rectangulaire et se compose de soixante-dix cartes partielles accompagnées de textes; l'autre, qui était sous forme d'un globe en argent, n'a pas survécu à la convoitise des hommes...

Parmi les orientations nouvelles apparues au XII^e siècle ou qui se sont développées à partir de cette date, citons la géographie

« religieuse », qui s'est intéressée aux itinéraires reliant les hauts lieux du culte musulman, et les *rihla* ou relations de voyage. Ce sont des mines d'informations rassemblées par les auteurs eux-mêmes, qui ont travaillé comme de « grands reporters ». Les plus célèbres d'entre elles sont celles de l'Andalou Ibn Jubayr au XII^e siècle et du Maghrébin Ibn Battûta au XIV^e.

La géographie mathématique _____

Le second grand chapitre de la géographie arabe, celui de la cartographie, est moins bien connu à cause de la rareté de la documentation et, plus particulièrement, de la perte ou de la détérioration des nombreuses cartes qui accompagnaient les textes. Cette tradition a commencé avec l'étude et la vérification du contenu des travaux des deux grands représentants de la cartographie grecque, Marinus au I^{er} siècle et Ptolémée au II^e. Les travaux de ce dernier

synthétisent des contributions antérieures et en reprennent les caractéristiques générales, comme la division du monde en sept climats, l'étendue des zones habitées, la disposition des terres, des mers et des océans et, en particulier, un tracé des côtes africaines qui rattache ce continent à l'Asie et représente l'océan Indien comme une mer intérieure.

Les premières productions originales dans ce domaine datent du début du IX^e siècle. Elles ont été réalisées à la demande du calife al-Ma'mûn. Deux cartes ont été réalisées durant son règne, celle qui porte son nom et celle du fameux mathématicien et astronome al-Khwârizmî, qu'il a insérée dans son *Livre de la configuration de la Terre*. La confection de ces cartes a été le résultat d'un travail d'équipe. Elle a été précédée par la détermination du périmètre de la Terre à partir de la mesure d'un degré du méridien, estimé alors à 111,8 km (valeur guère éloignée de celle

d'aujourd'hui, qui est de 111,3 km). Une autre partie du programme a consisté à calculer les coordonnées de nombreux points du globe, ce qui a permis d'enrichir la carte de plus de cinq cents localités supplémentaires. À cette occasion, on a décidé de changer une première fois le méridien zéro en le déplaçant de dix degrés à l'est des îles Canaries. Plus tard, d'autres astronomes ont choisi pour méridien d'origine un endroit proche de la côte est de la Chine. On a également mesuré les distances d'ouest en est et corrigé celles qui avaient été fournies par Ptolémée. C'est ainsi que la distance entre Tanger et Rome a été réduite de $2^{\circ}45'$ et la longueur de la Méditerranée de 10° . On a enfin amélioré le tracé des côtes et des îles méditerranéennes.

À partir de ces travaux pionniers, de nombreux auteurs ont régulièrement recalculé les latitudes et les longitudes de centaines de localités de l'Empire musulman ou de pays limitrophes. On

trouve les résultats de leurs calculs dans des écrits très variés, comme les tables astronomiques ou les compilations accompagnant les cartes ou les ouvrages de géographie descriptive. Il faut signaler, à ce propos, que les progrès réalisés dans la détermination des coordonnées, tant au niveau de la précision que de la vitesse de calcul, ont largement bénéficié des outils trigonométriques que les astronomes avaient considérablement enrichis, comme nous l'avons vu précédemment. Une autre particularité des premières cartes arabes, qui constitue un progrès, est l'abandon du tracé grec de l'extrémité de l'Afrique, désormais séparée de l'Asie, ce qui met l'océan Indien en contact avec l'océan Atlantique.

À la fin du x^e siècle, c'est encore une commande de l'État, celui des Fatimides au Caire, qui a amené le grand astronome Ibn Yûnus à réaliser une carte du monde qui, malheureusement, n'a pas été conservée.

À peu près à la même époque, al-Bîrûnî s'est intéressé spécialement aux techniques mathématiques permettant d'améliorer la réalisation des cartes. Dans son ouvrage intitulé *La Projection des figures et l'aplanissement des sphères*, il expose huit types de projections cartographiques dont deux au moins sont de sa propre invention : celle de la « double équidistance » et celle dite « globulaire », plus précise, qui n'a été redécouverte en Europe que six siècles plus tard. Vers le milieu du XI^e siècle, en Andalus cette fois, Ibn Khalaf et az-Zarqâlî, que nous avons déjà évoqués dans le chapitre sur l'astronomie, avaient mis au point et amélioré un type de projection utilisant le point vernal pour pôle. Leur invention, qui ne concernait au départ que la représentation plane du ciel, a été utilisée plus tard, en Europe, pour réaliser des cartes terrestres. C'est également à cette époque que l'on a pu observer une sorte d'autonomisation de la géographie

mathématique sous forme de chapitre indépendant.

À partir d'une date indéterminée, mais postérieure au XI^e siècle, on voit apparaître, sur certaines cartes, un réseau de coordonnées. Cette idée de quadriller l'espace a été pratiquée au X^e siècle, en particulier par le cartographe Suhrâb, mais les cartes qui nous sont parvenues, et qui utilisent un quadrillage, sont bien postérieures et appartiennent à la tradition persane : il s'agit de celles de Hamdallâh al-Qazwînî au XIV^e siècle et de Hâfiz au XV^e. On retrouve ce procédé du quadrillage dans une autre famille de cartes, appartenant à ce que les spécialistes appellent la « géographie sacrée ». À l'origine, il s'agissait de simples indicateurs de Qibla représentés par un cercle centré sur la Kaaba et portant, sur sa circonférence, disposées approximativement, les villes les plus importantes de l'Empire musulman. Le

fidèle, là où il était, pouvait ainsi trouver la direction de la prière grâce à cette « carte » rudimentaire qui était à la portée de tous puisqu'elle ne nécessitait aucun calcul préalable. Puis, à partir d'une date difficile à déterminer, les astronomes lui ont substitué une nouvelle carte dont tous les points représentés avaient été positionnés après que leurs coordonnées aient été calculées. Pour rendre cette carte plus maniable, on l'a remplacée par un instrument en métal ayant la forme d'un disque quadrillé muni d'une règle graduée et d'une boussole.

Il faut enfin évoquer deux types de cartes qui étaient des nouveautés pour l'époque : les portulans et les cartes-plans. Les premières ne représentent que les côtes en signalant tous les ports et les distances qui les séparent. Les secondes sont des cartes « abstraites » dans la mesure où les côtes et les frontières sont absentes et où seuls les itinéraires subsistent. Ces cartes étaient destinées au service du courrier, aux armées

en campagne et aux marchands qui se déplaçaient sur de grandes distances.

La médecine ou *l'art du corps et de l'âme*

Contrairement aux autres disciplines scientifiques, qui n'ont émergé qu'à partir du début du IX^e siècle, après les premières traductions d'ouvrages grecs et indiens, la médecine savante fut présente dès l'avènement de l'Islam, c'est-à-dire avant le milieu du VII^e siècle. Elle était pratiquée dans les communautés chrétiennes, syriaques et persanes qui avaient toujours conservé un enseignement de cet art dans leurs langues respectives. On rapporte que le Prophète avait un médecin, al-Hârith Ibn Kalada, qui avait acquis sa formation dans la ville perse de Gundishapûr, c'est-à-dire dans un milieu

savant. Mais c'était là un fait exceptionnel en Arabie.

La médecine traditionnelle _____

- Pour être précis, aux VII^e et VIII^e siècles, il y avait en fait deux types de pratiques médicales qui se côtoyaient. La première, que nous qualifierons ici de « traditionnelle », ne puisait pas son savoir-faire dans les livres, mais était plutôt basée sur l'expérience héritée des générations successives, nourrie de l'observation des pathologies, de la connaissance empirique des vertus des plantes et des aliments de chacune des régions de l'immense Empire qui venait de se constituer. Cette médecine « populaire », qui était pratiquée par des barbiers, des herboristes et des sages-femmes, était bien sûr composée de savoirs cloisonnés dépendant du milieu naturel des différents groupes de population où elle était pratiquée, mais avec l'avantage

d'être accessible à tous les habitants, et particulièrement aux plus démunis d'entre eux. En plus des soins qu'elle prodiguait aux malades, elle se préoccupait de la préservation de la santé par des recommandations portant sur l'hygiène et la diététique. À ces aspects purement médicaux se sont ajoutées des pratiques de type magique qui n'avaient rien de scientifique mais qui pouvaient, lorsque le patient y croyait, intervenir comme un accompagnement « psychologique » de la thérapie par les plantes et par les aliments.

Une partie de ces prescriptions – celles qui étaient adaptées au milieu naturel de l'Arabie du VII^e siècle – opérait largement du vivant du Prophète. Après sa mort, ses compagnons les ont rassemblées et elles ont finalement été intégrées, sous forme d'un chapitre indépendant, dans le corpus des Hadîth. Quelques siècles plus tard, des livres leur ont été consacrés, comme celui d'Ibn Qayyim al-Jawziyya, *La Médecine du Prophète*.

Outre des recommandations hygiéniques et diététiques, on y trouve des conseils visant à conserver une bonne santé physique et mentale, des recettes pour se protéger contre les poisons, des développements sur les bienfaits des relations sexuelles et sur la manière de soigner les différentes maladies d'amour. On y découvre aussi l'exposé des divers moyens servant à éloigner le mauvais œil, ainsi que des prières censées apporter soulagement ou réconfort au malade.

La médecine savante _____

Quant à la médecine que l'on apprenait dans les livres ou en suivant un enseignement, elle était déjà présente dans l'entourage des premiers califes omeyyades qui avaient recruté les meilleurs médecins de l'époque. Comme leur capitale était Damas, ce sont des praticiens de formation grecque ou syriaque qui obtinrent les premiers postes. Avec l'avènement de la

dynastie abbasside, les cartes ont été, en quelque sorte, redistribuées, avec l'entrée en scène de médecins d'origine persane, formés à Gundishapur. Mais, dans les deux cas, c'est une même médecine qui était à l'œuvre, apprise dans les ouvrages de Galien et d'Hippocrate, soit directement dans le texte grec, soit dans les versions syriaques réalisées au VI^e siècle. D'ailleurs, pour préserver leur monopole, chacune de ces communautés de médecins a continué, pendant un certain temps, à former ses étudiants dans la langue qu'elle maîtrisait. Pour les mêmes raisons, les premières traductions d'ouvrages médicaux grecs n'ont pas été réalisées en arabe mais en syriaque, langue de l'élite chrétienne du Croissant fertile. Pour avoir une idée du rôle du syriaque comme premier vecteur de la médecine grecque, il suffit de se rappeler que, à la fin du VIII^e et au début du IX^e siècle, quarante-cinq traités de Galien ont été traduits dans cette langue, dont une

grande partie par Ayyûb ar-Ruhâwî. Cette opération a été poursuivie, à une échelle encore plus large, par Hunayn Ibn Ishâq, qui a traduit ou retraduit, toujours en syriaque, quatre-vingt-quatorze écrits du même auteur.

C'est la diffusion de la langue arabe et son utilisation croissante dans les administrations et dans la vie de tous les jours qui ont progressivement favorisé l'arabisation de l'enseignement de la médecine, provoquant ainsi de nouvelles demandes, en particulier la traduction de toutes les œuvres médicales accessibles à partir soit du syriaque, soit directement du grec. Cette entreprise a été menée, au premier chef, par Hunayn Ibn Ishâq et ses disciples, relayés par quelques contemporains. Elle a permis de mettre la plus grande partie des écrits médicaux de Galien et d'Hippocrate à la disposition des praticiens et des étudiants, cette fois-ci en arabe. À ces deux corpus, il faudrait

ajouter quelques œuvres indiennes traduites du sanskrit et dont les plus connues sont celles de Kanaka (I^{er}-II^e siècle) et de Susruta (II^e siècle).

Les conceptions et les postulats de base de la médecine arabe proviennent donc essentiellement de la tradition médicale grecque, avec néanmoins quelques apports provenant du corpus des trois religions monothéistes. Ainsi, aux yeux des praticiens de l'époque, l'être humain est une composante de son environnement cosmique et sublunaire dont le fonctionnement est assuré par Dieu. Au sein de cet ordre déjà fixé, le corps humain assure son équilibre à l'aide des humeurs (au nombre de quatre) qui correspondent aux quatre éléments (terre, eau, air, feu) et de leurs qualités (froid, chaleur, humidité, sécheresse). Chaque individu possède une complexion caractérisée par une combinaison des qualités premières. À cela s'ajoutent les souffles porteurs de forces

qui permettent à l'organisme d'agir. C'est enfin la combinaison entre les humeurs, les complexions et les forces qui détermine l'état physiologique de chaque personne.

La pharmacopée a été élaborée à partir de ces principes de base. Partant des acquis du *Livre des médicaments simples* de Galien et du *Livre des plantes* de Dioscoride (I^{er} siècle), des médecins, des pharmaciens et des botanistes ont contribué à enrichir la nomenclature grecque de nouvelles plantes provenant des différentes régions faisant désormais partie du territoire musulman. Puis à ces végétaux se sont ajoutés certains minéraux et, d'une manière générale, des produits artificiels obtenus par combinaison de ces plantes et minéraux. Ces innovations ont été la conséquence à la fois du développement de la médecine et de l'approfondissement des nouvelles orientations de la chimie, que les premiers à explorer furent, dès le VIII^e siècle, Jâbir Ibn Hayyân et ses élèves. Les médicaments

se trouvant ainsi au carrefour de plusieurs disciplines, il n'est pas étonnant que de nombreux ouvrages leur aient été consacrés : plus d'une centaine d'auteurs ont écrit sur le sujet entre le IX^e et le XIII^e siècle. L'un des plus importants traités de cette catégorie est celui d'Ibn al-Baytâr, qui décrit mille quatre cents drogues médicinales dont quatre cents étaient inconnues des médecins grecs.

Les grandes orientations _____ de la médecine arabe

À partir de tous ces héritages, une tradition médicale arabe a lentement émergé en assimilant le savoir ancien, en l'approfondissant et en le prolongeant, avant de s'engager dans une phase d'innovation.

À ses débuts, la médecine était cantonnée au centre de l'Empire, en particulier à Damas et à Bagdad. C'est là qu'elle connut ses premières impulsions et que ses orientations essentielles se sont dessinées,

comme la prédominance de l'enseignement de Galien, le développement d'une médecine hospitalière et, surtout, la constitution d'une bibliothèque médicale arabe à la fois généraliste et spécialisée. En l'espace de quelques décennies, une communauté puissante et hiérarchisée a vu le jour, puisqu'on ne compte pas moins d'une trentaine de grands médecins pour la seule période antérieure au x^e siècle. Mais, à partir de cette époque, d'autres cités ont commencé à rivaliser avec la capitale de l'Empire. Ce fut le cas de Kairouan, du Caire, de Cordoue et d'un certain nombre de métropoles d'Asie centrale comme Chiraz et Rayy. C'est d'ailleurs dans cette dernière ville que, à la fin du ix^e siècle, s'est formé le médecin ar-Râzî, dont les premières synthèses et les démarches cliniques ont inauguré de nouvelles voies dans la tradition médicale arabe. Les travaux de ses successeurs n'ont pas pu rivaliser avec les siens dans le domaine clinique, mais ils sont allés plus

loin dans le travail de synthèse en s'inspirant de ce qu'il avait lui-même accompli et, parfois, en le critiquant. C'est le cas du *Livre complet de l'art médical* d'al-Majûsî, un médecin de Bagdad originaire d'Ahwâz, et du *Livre pratique à l'usage de celui qui ne peut composer* de l'Andalou az-Zahrâwî. L'aboutissement de tous ces efforts a été, incontestablement, l'œuvre d'Ibn Sînâ et plus particulièrement son *Canon de la médecine*.

La phase suivante de la médecine arabe, qui a commencé au XII^e siècle, a été celle de l'assimilation et de l'enseignement des encyclopédies médicales que nous avons évoquées, avec la publication de deux types d'ouvrages de nature totalement opposée. Le premier englobe de nombreuses monographies spécialisées, comme celles qui ont été consacrées à la chirurgie ou à l'ophtalmologie. Le second, quantitativement plus important, est constitué de résumés et de commentaires qui ne sont pas tous de simples reprises

abrégées ou diluées d'un savoir définitivement accepté. C'est le cas, par exemple, du *Commentaire sur l'anatomie du Canon* d'Ibn an-Nafîs, un médecin du Caire du XIII^e siècle, dans lequel, pour la première fois dans l'histoire, il explique la circulation pulmonaire.

La période en question est également celle de l'extension de la médecine hospitalière. Il faut préciser que le concept d'hôpital s'est imposé relativement tôt. En effet, encouragés par un impératif religieux qui fait obligation au croyant de soigner toute personne malade quelle que soit sa place dans la société, des hommes de pouvoir et des médecins ont entamé, à partir du IX^e siècle, les prémices d'une politique de santé. On en attribue l'initiative au calife Harûn ar-Rashîd, qui régna de 786 à 809 et qui aurait fait construire un premier hôpital à Bagdad. Un second y a été fondé en 979. Au total, la capitale de l'Empire a bénéficié de sept établissements. Des

dizaines d'autres ont été en activité dans des métropoles régionales comme Damas, Kairouan, Marrakech, Grenade en Andalus et, surtout, Le Caire, qui a compté jusqu'à cinq bimaristans, comme on les appelait alors, dont certains, comme l'hôpital al-Mansûrî, étaient très imposants. La plupart de ceux qui ont été préservés sont postérieurs au XII^e siècle. Ils illustrent donc un phénomène culturel et sociétal qui va au-delà de la générosité ponctuelle de tel ou tel mécène fortuné.

S'agissant de la médecine pratiquée dans ces établissements, les nombreux témoignages qui nous sont parvenus nous permettent de dire qu'elle était diversifiée et de haut niveau, par comparaison, bien sûr, avec ce qui se pratiquait à la même époque hors des pays d'Islam. Chaque hôpital possédait un certain nombre de services (médecine générale, ophtalmologie, obstétrique, etc.), avec un spécialiste à la tête de chacun d'eux. Ils

comprenaient également une pharmacie où venaient s'approvisionner gratuitement les malades munis d'une ordonnance délivrée par le médecin soignant. Dans certains hôpitaux, une unité recevait les aliénés. Dans d'autres, on pratiquait des actes chirurgicaux. Il nous est d'ailleurs parvenu des traités ou des chapitres d'ouvrages consacrés exclusivement aux instruments chirurgicaux, comme ceux d'az-Zahrâwî et d'al-Halabî. Il faut enfin signaler que ces établissements étaient également des lieux d'enseignement de la médecine.

En conclusion, nous devons évoquer un élément important, celui de la baisse du niveau de l'enseignement médical et de la qualité des soins à partir du xv^e siècle. Ce sont essentiellement des facteurs externes à la pratique médicale et à la science en général qui permettent d'avancer une première explication de ce phénomène. Il s'agit d'abord des éléments que l'historien maghrébin du xiv^e siècle Ibn Khaldûn

associe au déclin global d'une civilisation. À cela, il faut ajouter les facteurs que cet auteur ne pouvait pas encore discerner et qui ont été à l'œuvre, dès le XII^e siècle, dans la lente dégradation du contexte socio-économique dans lequel se pratiquaient les sciences et en particulier la médecine. Mais il est aussi vrai, et cela a été observé dans d'autres disciplines comme les mathématiques, que des considérations culturelles, idéologiques ou philosophiques n'étaient pas étrangères à la stagnation ou, si l'on préfère, au manque d'initiative qui a caractérisé la médecine arabe, même au moment de son âge d'or. En disant cela, nous pensons surtout à l'absence de progrès en anatomie, due au rejet de la dissection. Or ce rejet, partagé par toutes les sensibilités et toutes les confessions du corps médical de l'époque, n'est pas particulier à la période de déclin, puisqu'il a toujours existé.

La chimie ou *l'art par excellence*

Depuis l'Antiquité jusqu'au xvii^e siècle, la chimie a connu essentiellement deux formes d'activités. La première, qui a gardé le nom de « chimie », comprenait non seulement les opérations permettant d'analyser la composition des différentes formes de la matière, mais aussi la fabrication de nouveaux produits par transformation ou combinaison de produits déjà existants. La seconde, appelée « alchimie », concernait essentiellement les aspects philosophique et ésotérique accompagnant certaines pratiques chimiques, et plus particulièrement des procédés visant à obtenir la transmutation d'un

métal quelconque en or, ainsi que des manipulations complexes dont le but était de produire le médicament censé guérir toutes les maladies et que l'on appelait « élixir ».

· Dans la tradition scientifique arabe, il n'y avait qu'un seul mot pour désigner à la fois la chimie et l'alchimie : *al-kimiya*, dont l'origine est incertaine et que l'on a fait dériver tour à tour du grec, de l'égyptien et parfois même de l'arabe lui-même. Cette discipline est également appelée « sagesse » ou « art ». En terre d'Islam, ses activités ont revêtu différentes formes : fabrication d'encres et de fards, de couleurs et de pigments (en particulier pour la céramique et pour la peinture sur divers supports) ; composition de divers produits servant à l'industrie textile (solvants, fixateurs, dégraissants) ; réalisation de produits d'hygiène et de beauté (cosmétiques, parfums, savons) ; travail du verre et du pétrole ; conception et réalisation, à des fins

militaires, d'engins incendiaires, d'explosifs et de poudre; fabrication de médicaments et de poisons; travail des pierres précieuses; préparation de boissons alcoolisées; etc. Quant aux pratiques qui visaient à la transformation des métaux ordinaires en or, elles ne sont pas différentes de celles qui viennent d'être évoquées et, au-delà de leurs buts illusoires et du discours ésotérique qui les accompagnaient, elles contribuaient, de fait, à une meilleure connaissance de la matière et participaient donc aux progrès de la chimie en tant que science expérimentale.

Parmi les héritages qui ont été à la base de la tradition chimique arabe, mentionnons tout d'abord celui de l'Égypte ancienne, attesté par plusieurs références et qui s'est maintenu, par transmission orale, jusqu'à l'époque hellénistique. Les auteurs les plus souvent cités par les chimistes arabes sont Marie (v^e siècle av. J.-C.), Cléopâtre (la si fameuse Cléopâtre, qui vécut au 1^{er} siècle

av. J.-C.) et surtout Zosime de Panopolis (IV^e-V^e siècle) qui serait, à lui seul, l'auteur d'une trentaine d'ouvrages sur la chimie. L'héritage grec est également important puisque des dizaines d'écrits ont été traduits en arabe. Les spécialistes grecs de ce domaine sont Archélaos, Petaos, Ars le Sage et Apollonios de Tyane. Mais on trouve aussi des noms de personnages plus connus pour leurs activités de philosophes, comme Pythagore, Socrate, Platon et Aristote, auxquels on a attribué, soit par ignorance soit de manière délibérée, des ouvrages appartenant essentiellement au domaine ésotérique de la chimie. À ces deux héritages, il faudrait ajouter celui de la Mésopotamie dont le représentant éminent est Hermès, à qui les bibliographes arabes attribuent une douzaine d'écrits. Mais, comme cela est observé pour d'autres auteurs, il semble qu'il soit le représentant d'un groupe ou d'une école ayant produit collectivement.

L'une des activités essentielles de la chimie arabe a été la métallurgie. Les métaux les plus utilisés et travaillés furent l'or, l'argent, l'étain, le cuivre, le fer, le mercure et le plomb. À ces éléments de base, il faudrait ajouter des minerais métalliques comme les oxydes et les sels ainsi que des corps non métalliques comme le soufre, l'arsenic et l'antimoine. Mais les chimistes des pays d'Islam se sont intéressés aussi aux matières organiques et aux minéraux. On sait, par exemple, que la mise en évidence de certains acides minéraux (ou inorganiques) a été réalisée à l'époque de Jâbir Ibn Hayyân, au VIII^e siècle, par lui ou par d'autres chimistes. Ces acides provenaient de la distillation de l'alun, du sel ammoniac, du salpêtre, du sel marin et du vitriol. On sait aussi que l'identification de l'alcool est souvent attribuée au grand médecin ar-Râzî, qui vécut à la fin du IX^e siècle et au début du X^e.

Parmi les produits de consommation courante dont l'invention ou l'amélioration

des procédés de fabrication sont attribués aux chimistes de cette civilisation, citons le savon (obtenu, en particulier, à partir de l'huile d'olive), des huiles essentielles produites à partir de la distillation de végétaux divers comme les roses, les fleurs d'oranger, des plantes aromatiques, ou encore des huiles végétales obtenues à partir de graines de coton ou de moutarde, de noyaux d'abricot, de résine de pin, etc. L'accroissement de la consommation de ces produits est à l'origine du développement de certaines activités chimiques et de leur passage du stade artisanal à celui de la manufacture. On a ainsi recensé un grand nombre d'unités de production disséminées à travers tout le territoire de l'Empire. Il nous est d'ailleurs parvenu des miniatures montrant des systèmes d'alambics montés en série et illustrant ce stade « industriel » de la production.

Le pétrole fait également partie des produits qui ont intéressé les chimistes

arabes : comme on le sait, il était connu et utilisé depuis l'Antiquité, en particulier pour embaumer les momies, imperméabiliser des bateaux et des constructions, etc. Il a également été distillé par les chimistes et utilisé soit comme médicament, soit comme élément entrant dans la composition d'engins incendiaires.

À ces produits de base, il faudrait ajouter des produits de luxe qui répondaient à une demande stimulée par l'avènement ou le développement de nouvelles couches sociales. C'est également la multiplication des élites qui pourrait expliquer l'augmentation de la production de boissons alcoolisées, malgré l'interdit religieux qui les frappait. C'est d'ailleurs grâce à la distillation mise en œuvre pour fabriquer certaines de ces boissons que les chimistes arabes auraient produit, pour la première fois, de l'alcool éthylique.

L'un des domaines de la chimie appliquée ayant eu une grande incidence sur la vie

quotidienne est le travail du verre. La fabrication de ce produit faisait intervenir une foule de substances comme la silice, le natron, le calcaire, la soude, la potasse, la magnésie, etc., auxquelles il faut ajouter celles qui participaient à la coloration et à la décoration des verres : oxydes métalliques divers, sels de plomb, etc. Elle nécessitait aussi des installations de grande taille (fours et creusets) et des instruments de manutention (cannes de fer pour souffler, tiges, pinces, tenailles, etc.). Quant aux procédés de fabrication, ils étaient relativement sophistiqués : frittage (opération permettant d'éliminer les substances gazeuses), broyage, mélange des produits de base avec du verre concassé, fonte et soufflage. Dans l'Empire musulman, c'est la Syrie qui a été la région la plus productive dans le domaine de la verrerie. Ce sont d'ailleurs des verriers syriens qui, au 1^{er} siècle, ont introduit la technique du soufflage, qui a représenté

un progrès considérable dans le travail du verre.

Un autre domaine se rattache, d'une manière ou d'une autre, à la chimie industrielle : celui des supports et des outils de l'écriture (papiers, encres, couleurs). À partir d'emprunts chinois ou persans, une première fabrique de papier a été construite à Samarkand dans la seconde moitié du VIII^e siècle, et une seconde à Bagdad à l'époque du célèbre calife Hârûn ar-Rashîd. Puis, à partir du IX^e siècle, les techniques de fabrication se sont diffusées dans tout l'Empire et ont été gardées secrètes pendant des siècles, afin de préserver le monopole de la production. Mais elles ont fini par être connues grâce aux informations tirées d'ouvrages tardifs, puis confirmées par des miniatures et par l'analyse des différentes catégories de papiers qui nous sont parvenues. La fabrication du papier se faisait en respectant les étapes suivantes : fermentation des fibres (de chanvre, de

coton ou de vieux chiffons), blanchiment à l'aide de chaux liquide, rinçage, pilonnage, amidonnage, séchage et polissage.

Les procédés et techniques de la chimie arabe étaient nombreux et variés. On peut les classer en fonction des opérations qui étaient réalisées. La plus importante est, incontestablement, la distillation. Elle consiste à extraire d'un produit les corps les plus volatiles qui entrent dans sa composition. Pour y parvenir, on provoque la transformation en vapeur du corps que l'on veut obtenir, puis on condense cette dernière par refroidissement; on obtient ainsi un liquide que l'on recueille. En pays d'Islam, certains des instruments permettant de réaliser la distillation étaient très anciens, même s'ils ont connu quelques perfectionnements au cours du temps, tandis que d'autres ont été inventés entre le IX^e et le XII^e siècle, sans que l'on sache toujours qui étaient leurs premiers concepteurs. Parmi ces instruments ou ces objets, on

peut citer la cornue, l'alambic et le bain de refroidissement (couramment appelé « tête de maure »). D'autres opérations ont été pratiquées à grande échelle, dont, par exemple, la fusion, la solidification, la calcination et la sublimation.

Ce dernier procédé consiste à transformer un corps solide en un gaz sans passer par l'état liquide, le but étant de récupérer un « sublimé » qui se dépose sur les parois de l'appareil grâce à la cristallisation des vapeurs gazeuses. Cette opération vise souvent à purifier un produit. C'est le cas, par exemple, pour le soufre, le mercure, l'arsenic, la pyrite de fer, l'oxyde de fer, l'oxyde de zinc, etc. Mais elle vise aussi l'oxydation de certains minerais ou la combinaison de plusieurs corps. Les chimistes arabes ont pratiqué la sublimation du mercure, mais également celle du sulfure d'arsenic et de l'oxyde de fer. Ils utilisaient pour cela un appareil appelé *athâl* (devenu « aludel » en français).

Les démarches des chimistes arabes, depuis les pionniers comme Jâbir Ibn Hayyân et ar-Râzî jusqu'aux auteurs tardifs comme al-Jildakî au XIV^e siècle, étaient en grande partie basées sur l'expérimentation, qui consistait à manipuler des produits, à les peser, à les composer pour en obtenir de nouveaux puis, dans une dernière étape, à en déduire soit des classifications, soit des analyses. Comme on le voit, ces démarches préfigurent certaines de celles de la chimie moderne et ont été, à tout le moins, à l'origine des pratiques adoptées par les premiers chimistes de l'Europe prémoderne.

Dans les biobibliographies arabes, on considère le prince omeyyade Khâlid Ibn Yâzîd, qui vécut au VII^e siècle, comme le pionnier de la chimie en pays d'Islam. C'est lui qui aurait commandé les premières traductions en arabe de livres de chimie grecs et coptes, et qui serait l'auteur d'au moins trois ouvrages de chimie – mais certains spécialistes ont mis en doute

ces attributions. Au VIII^e siècle, Ja'far as-Sâdiq est crédité de six écrits dans ce domaine. Cela dit, la tradition chimique s'est réellement constituée sur la base des travaux de Jâbir Ibn Hayyân et de ses élèves, qui seraient les auteurs d'une centaine d'ouvrages. Ils auraient découvert la soude caustique, l'eau régale, les acides sulfurique, nitrique et chlorhydrique. Leur chimie a été très expérimentale même si, dans sa présentation, elle est enveloppée du discours ésotérique qui a caractérisé l'alchimie antique, islamique et médiévale, masquant ainsi parfois l'aspect scientifique de cette discipline. Ce sont également eux qui auraient étendu le domaine de la chimie aux matières organiques et aux substances végétales. Ils auraient aussi étudié les propriétés du mercure. Dans le prolongement de leurs travaux, mais en rupture avec les idées qui les accompagnaient, il faut signaler les contributions du philosophe

al-Kindî, farouche opposant à la théorie de la transmutation des métaux en or et connu pour son ouvrage sur le travail du fer, utilisé dans la fabrication des épées. Après lui et malgré ses critiques, le courant ésotérique ne s'est pas affaibli, mais il n'a pas entravé l'orientation expérimentale de la chimie qui a connu, au x^e siècle, un grand représentant en la personne du fameux médecin ar-Râzî. Ce dernier admettait l'idée de la transmutation, mais ses travaux de laboratoire ont toujours eu un caractère scientifique. Cela apparaît clairement dans sa description des instruments qu'il utilisait et des opérations chimiques qu'il effectuait. Il est également crédité d'une classification des substances chimiques en trois catégories : minérale, végétale et animale. Son *Livre des secrets* marque une étape importante dans l'histoire de la chimie arabe. Le siècle d'ar-Râzî est d'ailleurs considéré par les historiens des sciences comme celui du grand développement de cette discipline.

Et son succès lui a valu, à l'époque, la publication d'ouvrages de vulgarisation, comme ce fut le cas pour les autres sciences. C'est ainsi qu'un chapitre important lui est consacré dans *Les Clés des sciences* d'al-Khwârizmî al-Kâtib et un autre dans les fameuses *Épîtres* des Frères de la pureté. Au cours des siècles suivants, on a observé une activité soutenue en chimie, avec de nombreuses publications dont la majorité n'a pas encore fait l'objet d'études. Parmi les chimistes les plus en vue pour cette longue période, citons al-Katî au XI^e siècle, at-Tughrâ'î et un anonyme andalou du XII^e, al-'Irâqî au XIII^e et al-Jildakî au XIV^e. Comme on le voit, la phase arabe de l'histoire de cette discipline n'a pas encore révélé tous les aspects de son activité ni l'ensemble de ses contributions.

La mécanique ou *la science des procédés ingénieux*

Dans la tradition scientifique arabe, la partie technique et appliquée de la mécanique est appelée, à la suite des Grecs, « science des procédés ingénieux ». Elle comprend trois grands domaines qui se sont développés en parallèle. Le premier rassemble tous les automates dont la seule finalité est de distraire. Le deuxième regroupe les différents instruments de la mécanique utilitaire (c'est-à-dire les horloges, l'ensemble des dispositifs hydrauliques au service de l'irrigation, les moulins pour les minoteries et les fabriques de papier, les engins de levage, les lampes automatiques et les serrures). Le troisième domaine est

celui de la technologie militaire : armes de poing, lanceurs de projectiles, engins de siège. La partie de la mécanique qui traite de ses problèmes théoriques (chute et équilibre des corps, hydrostatique, dynamique) a également fait l'objet d'études que l'on rattache habituellement au chapitre de la physique et que nous n'évoquerons pas ici.

À la suite des Grecs dont ils ont connu certains travaux, comme ceux de Philon de Byzance, d'Archimède et de Héron d'Alexandrie, les spécialistes arabes de mécanique ont appliqué les idées de leurs prédécesseurs en les développant et en les prolongeant par des innovations ingénieuses. Leurs travaux se sont étalés du IX^e au XVI^e siècle. En voulant réaliser des systèmes plus ou moins automatisés, ils ont eu à résoudre des problèmes théoriques, ce qui les a conduits à inventer certains concepts importants de la mécanique.

Le premier ouvrage arabe de mécanique, *Le Livre des procédés ingénieux*, fut écrit

par les trois frères Banû Mûsâ au IX^e siècle. Il a été suivi par une série de traités dont la publication s'est étalée entre le XI^e et le XVI^e siècle. Par bonheur, certains de ces écrits nous sont parvenus. Un seul représente la tradition mécanique d'al-Andalus : *Le Livre des secrets* d'al-Murâdî, qui date du XI^e siècle et 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, comme *Le Recueil de la théorie et de la pratique utile dans l'art des procédés ingénieux* d'al-Jazarî, du XII^e siècle, ou *Le Livre des procédés nobles sur les instruments merveilleux* d'Ibn Ma'rûf, du XVII^e siècle. 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, du XIII^e siècle, et *Le Livre élégant sur les catapultes* d'az-Zaradkâshî, du XV^e siècle.

La mécanique ludique _____

Partant, là aussi, de l'héritage grec, et plus particulièrement des travaux de Philon de Byzance, au III^e siècle av. J.-C., et de Héron d'Alexandrie, au I^{er} siècle av. J.-C., traduits en arabe au IX^e siècle, les premiers spécialistes qui se sont intéressés à la mécanique ludique – c'est-à-dire essentiellement à la fabrication d'automates – ont d'abord étudié puis développé les procédés ingénieux anciens. Dans une seconde phase, ils se sont mis à concevoir de nouveaux systèmes, parfois très sophistiqués, en combinant différents principes techniques comme les siphons, les poulies, les roues dentées, les flotteurs et les manivelles. Dans le cadre de ces réalisations ingénieuses, ils ont été amenés à introduire, pour la première fois à notre connaissance, quelques innovations significatives, comme la soupape et le mécanisme qui permet la transformation du mouvement rectiligne en mouvement circulaire.

Les réalisations dans ce domaine étant coûteuses, il était nécessaire de disposer d'une clientèle sûre pouvant financer la conception et la fabrication des mécanismes ludiques. Ces consommateurs existaient : ils provenaient des nouvelles couches aisées formant l'élite du pouvoir, de l'administration et des marchands. Citons, parmi les automates proposés, des verseurs de liquides de diverses couleurs ou températures, des verseurs ou des jets d'eau musicaux, des bateaux à propulsion automatique, etc.

Le traité de mécanique arabe le plus ancien est celui des Banû Mûsâ du IX^e siècle. Il est presque entièrement consacré aux automates. Mais si toute une profession s'est constituée autour de la fabrication de ce type de mécanismes, à notre connaissance, aucun ouvrage nouveau n'est venu enrichir ce domaine avant le XII^e siècle. À cette date, un important traité fut publié, celui d'al-Jazarî, qui marque une sorte de renouveau

des aspects théoriques de ce domaine. Même si les automates ne constituent qu'une modeste partie de l'ouvrage, il ne reprend nullement les anciens mécanismes, puisqu'il ne présente que des systèmes de son invention. Cette tradition s'est poursuivie jusqu'au XVI^e siècle au moins, comme cela est confirmé par l'ouvrage d'Ibn Ma'rûf dans lequel sont décrits des instruments d'agrément semblables à ceux qui avaient été conçus par ses prédécesseurs.

Les horloges _____

Dans l'Empire musulman, la mesure du temps répondait à la fois aux besoins de la vie quotidienne (qui ne différaient pas de ceux des autres sociétés) et aux nécessités de la pratique religieuse. En effet, nous l'avons vu, le bon pratiquant était tenu de connaître le moment de chacune des cinq prières quotidiennes. Pour mesurer le temps, on utilisait différents procédés.

L'un des plus anciens, que nous avons déjà décrit p. 75, est le gnomon. Pour connaître l'heure à tout moment, y compris la nuit, il fallait concevoir des systèmes mécaniques moins contraignants que le sablier. Les plus anciens de ces systèmes utilisent le principe de l'écoulement régulier d'un liquide (eau ou mercure) : c'est le principe des clepsydes. Le plus simple des modèles de clepsydre connus (qui serait d'origine égyptienne) est basé sur le principe de l'écoulement de l'eau contenue dans un récipient conique rétréci et muni d'un orifice. La baisse régulière du niveau de l'eau dans le récipient mesurait le temps écoulé.

À partir d'un héritage ancien de diverses origines (grecque, byzantine, persane), de nouveaux modèles sont conçus en pays d'Islam à partir de la fin du VIII^e siècle. L'ancienneté de la tradition arabe est confirmée par l'horloge envoyée par le calife Hârûn ar-Rashîd à l'empereur Charlemagne. Au X^e siècle, le

mathématicien Ibn al-Haytham évoque l'un de ses écrits, aujourd'hui perdu, dans lequel il décrit une horloge de sa conception. La première clepsydre à mercure se trouve présentée dans le traité d'al-Murâdî, le spécialiste d'al-Andalus que nous avons déjà évoqué. Dans son ouvrage, on trouve également la description d'une horloge annonçant les heures à l'aide de lampes qui s'allument successivement. À la même époque, le grand astronome az-Zarqâlî réalise deux horloges hydrauliques géantes à Tolède, sur les rives du Tage. Au début du XII^e siècle, en Orient cette fois, al-Khâzinî décrit un nouveau modèle de clepsydre, appelé « balance universelle », qui fonctionnait vingt-quatre heures sur vingt-quatre et qui donnait les heures et les minutes. Mais c'est al-Jazarî qui, au XII^e siècle, a été le meilleur concepteur arabe d'horloges hydrauliques, tant au niveau de la précision des mécanismes que de leur sophistication. Dans son livre, il en décrit

dix : six d'entre elles sont des clepsydres, les autres des horloges à bougies (dans lesquelles le temps est marqué par le degré d'usure des bougies).

Manifestement, le XII^e siècle a été faste en mécanismes d'horlogerie puisque deux autres spécialistes nous ont laissé des témoignages de leurs savoir-faire en la matière : as-Sâ'âtî et son fils. Le premier conçut une horloge de grande dimension, à Damas, et le second s'est chargé de sa restauration. À cette occasion, il publia un livre pour en détailler le principe et expliquer son mécanisme. Toujours en Orient, il nous faut signaler l'un des derniers représentants de cette littérature technologique, Ibn Ma'rûf, qui consacra un livre entier aux mécanismes d'horlogerie, intitulé *Les Planètes perlées sur les clepsydres arrondies*.

Nous ne connaissons pas encore les apports des techniciens d'Asie centrale, mais nous savons qu'en Occident musulman la

tradition des horloges mécaniques s'est poursuivie après al-Murâdî et az-Zarqâlî. Nous avons d'ailleurs des preuves matérielles de ce fait avec ce qui subsiste des horloges construites au Maghreb, dans deux lieux prestigieux de la ville de Fez : la Madrasa Bû 'Inâniya et la mosquée Qarawiyîn.

La mécanique hydraulique _____

Compte tenu de la situation géographique des territoires situés à l'intérieur des frontières de l'Empire musulman, le problème de l'eau a toujours préoccupé les populations de ces régions et plus particulièrement celles de leurs cités. À partir du IX^e siècle et jusqu'au XV^e, aux causes anciennes de la rareté de l'eau (faible pluviométrie, irrégularité des débits des rivières, topographie des lieux) se sont ajoutées de nouvelles, consécutives au phénomène de développement des villes : extension des terres consacrées à

l'agriculture vivrière, avènement d'une agronomie de luxe liée à l'élévation du niveau de vie de certaines couches de la société, multiplication des manufactures, grandes consommatrices d'eau – en particulier celles qui produisaient des tissus et du papier. Cette situation a encouragé, dans un premier temps, la restauration ou la multiplication des procédés anciens qui assuraient efficacement la récupération de l'eau (chadoufs, sâqiyas, norias), son stockage (barrages et bassins) et son acheminement (aqueducs, qanâts); elle a également favorisé la conception de nouveaux mécanismes ingénieux visant à augmenter le rendement de ces procédés.

Lorsqu'elle était abondante, l'eau servait aussi de force motrice, en particulier pour actionner des moulins. Ces derniers étaient fixés sur les berges des rivières ou sur des piles de pont, ou bien ils flottaient sur des barges, au milieu du fleuve, comme à Bagdad aux IX^e et X^e siècles. Mais il y avait d'autres types

de moulins qui fonctionnaient grâce à la force humaine, animale, éolienne ou même celle des marées, comme ce fut le cas à Bassora à une certaine époque. Lorsque les conditions le permettaient, la croissance démographique des villes a favorisé la concentration des moulins. Au x^e siècle, on en a dénombré soixante-dix à Nishapour, en Iran, et, au xiv^e siècle, des centaines dans la ville de Fez. On utilisait les moulins de deux manières : certains étaient destinés à la production alimentaire (farine, riz, canne à sucre), d'autres jouaient un rôle industriel (travail des métaux, fabrication de différents types de papier).

Les ouvrages consacrés à la mécanique hydraulique ne sont pas nombreux, mais les vestiges qui nous sont parvenus, dispersés un peu partout dans le monde musulman, attestent clairement que la technologie des systèmes hydrauliques était présente à toutes les époques et qu'elle devait être transmise beaucoup plus par initiation

directe que par un enseignement classique utilisant des manuels. D'ailleurs le plus ancien ouvrage connu qui expose de tels systèmes date du début du XIII^e siècle : il s'agit du traité d'al-Jazarî que nous avons déjà évoqué. On y trouve la description de plusieurs mécanismes hydrauliques dont certains étaient basés sur des idées nouvelles. C'est en particulier le cas d'un appareil à balancier utilisant le principe de l'engrenage segmentaire, ainsi que celui d'une pompe à eau fonctionnant grâce à la transformation du mouvement circulaire en mouvement rectiligne alternatif et à l'utilisation de tuyaux d'aspiration.

_____ **Les technologies militaires**

Les ouvrages qui traitent des technologies militaires sont parmi ceux qui ont intéressé au premier chef les pouvoirs musulmans. On sait que, dès l'époque omeyyade, les califes cherchaient à se procurer des traités

sur l'« art de la guerre ». Mais, comme cela peut se comprendre aisément, la plus grande partie de ce savoir a dû rester secret pendant de longues périodes, ce qui explique sans doute que nous ne disposons pas d'écrits sur ce sujet pour les premiers siècles de l'Empire musulman : les plus anciens ouvrages qui nous soient parvenus datent de la fin du XII^e siècle. À leur lecture, trois grands thèmes se dégagent. Le premier concerne l'art de la cavalerie, c'est-à-dire des tournois et des formations de combat. Les traités les plus importants sur ce sujet sont *Le Livre de la cavalerie* d'ar-Rammâh, du XIII^e siècle, et *Le Livre de l'ultime interrogation et le souhait sur l'enseignement des exercices de cavalerie* d'al-Aqsarâ'î, du XIV^e siècle. Le deuxième thème concerne le tir à l'arc. On y trouve la description des différents types d'arcs en usage dans les armées musulmanes ainsi que leurs procédés de fabrication et la manière de les utiliser. L'un des ouvrages les plus connus sur le sujet, qui date du

XIV^e siècle, est *Le Vœu et l'ultime désir sur le charme des flèches* d'al-Baklamîshî. Le troisième thème regroupe à la fois l'art de la tactique, de l'organisation militaire et des technologies de guerre. Les auteurs y exposent les connaissances de l'époque sur les fortifications, les techniques et les moyens pour réussir un siège, les différentes manières de disposer les troupes au combat et toutes les ruses de guerre. Les traités les plus connus dans ce domaine, qui datent du XII^e siècle, sont *L'Instruction des maîtres d'at-Tarsûsî* et *L'Aide-Mémoire sur les ruses de guerre* d'al-Harawî. En plus de ces ouvrages généraux, qui consacrent un chapitre aux instruments de guerre, il existe des écrits plus spécialisés qui ne traitent que des aspects technologiques. Le plus ancien d'entre eux, qui date du IX^e siècle, *Le Livre sur les instruments de guerre* des frères Banû Mûsâ, n'a pas encore été retrouvé. Au X^e siècle, des hommes de science ont publié des écrits sur les miroirs ardents,

censés pouvoir incendier les positions ennemies, sur terre ou sur mer – nous ne savons pas s'ils ont dépassé le stade théorique. Pour les autres technologies, nous disposons d'un ouvrage du xv^e siècle, *Le Livre élégant sur les mangonneaux* d'az-Zaradkâshî, qui reprend ce qui a pu être publié sur ce sujet au cours des siècles précédents et ajoute des éléments de son époque. Comme son titre l'indique, il y est question des catapultes et de tous les projectiles qu'il est possible de lancer avec cet engin, comme les boulets en pierre, les flèches, les boules de naphte, les fusées éclairantes et les bombes asphyxiantes. Cet ouvrage est l'un des derniers à traiter des armes classiques. À partir du milieu du xvi^e siècle, avec l'avènement du canon et des fusils utilisant la poudre, c'est une ère nouvelle qui s'ouvre pour les technologies guerrières.

Les sciences arabes en Europe ou *l'appropriation d'un savoir nouveau*

Tout d'abord, et avant d'exposer les faits, examinons une question de terminologie : comment qualifier l'avènement des sciences arabes dans l'espace latin ? Ce phénomène a commencé à balbutier à la fin du x^e siècle en Catalogne, a esquissé quelques pas encourageants à la fin du xi^e dans le sud de l'Italie, puis a explosé à Tolède et à Palerme au début du xii^e, en un feu d'artifice qui a littéralement « illuminé » les quelques foyers de savoir de l'Europe médiévale. S'agit-il d'une transmission, d'une circulation ou de quelque chose d'autre ? À suivre minutieusement les différentes péripéties de cette belle aventure de l'esprit, on constate

facilement qu'il ne s'agissait pas d'une transmission au sens propre du terme, dans la mesure où les musulmans n'ont jamais pensé transmettre ce qu'ils avaient appris de leurs maîtres grecs, indiens et mésopotamiens ni ce qu'ils avaient élaboré durant plus de trois siècles.

Il y a au moins deux raisons à cette attitude. La première est liée aux relations conflictuelles, plus ou moins larvées, qui prévalaient à cette époque entre la « Maison de l'Islam » et ce qui constituait la « Maison de la guerre », c'est-à-dire essentiellement la chrétienté d'Occident. La seconde raison était plutôt culturelle : les élites des pays d'Islam considéraient que les sociétés vivant hors de leurs latitudes ne disposaient pas encore des conditions objectives permettant l'acquisition des sciences.

On peut qualifier le phénomène en question de « circulation », mais l'inconvénient de ce terme « neutre » est de masquer l'aspect le plus intéressant de

cette opération : sa dimension humaine. Il est clair que ni les idées scientifiques, ni les livres, ni les instruments n'ont circulé tout seuls. Il y a eu des jeunes gens qui se sont décidés, un jour, individuellement ou en groupe, d'aller là où on leur avait dit que les sciences étaient florissantes, de faire l'effort d'apprendre l'arabe, puis de s'engager dans une longue entreprise de traduction, aidés par des hommes de toutes confessions. Parmi eux, certains venaient d'Angleterre (Robert de Chester, Adélard de Bath), d'Espagne (Jean de Séville), d'Italie (Gérard de Crémone, Plato de Tivoli), de Dalmatie (Hermann de Carinthie). Des chercheurs qui se sont perchés sur cette entreprise collective l'ont qualifiée d'« appropriation » pour ce qu'elle a représenté de décisions et d'initiatives volontaires en vue de rendre disponible tout ce qui était accessible du patrimoine scientifique grec et arabe. Il nous semble que c'est le bon terme, à la fois pour décrire cette aventure humaine qui

préfigurait la future modernité de l'Europe et pour éviter le terme de « transmission », longtemps utilisé et qui réduit le rôle des jeunes passeurs européens à de simples relais.

Dans les faits, les premières initiatives se situent à la fin du x^e siècle et ont concerné l'utilisation de l'astrolabe. Ce serait Gerbert d'Aurillac, le futur pape Sylvestre II, ou peut-être l'un de ses élèves qui en aurait assuré la première diffusion. Quelques décennies plus tard, près de Salerne cette fois, c'est Constantin l'Africain, un Carthaginois chrétien ou christianisé, qui réalise les premières traductions d'ouvrages médicaux arabes. Leur contenu, enrichi par les traductions ultérieures, renouvellera complètement l'enseignement de la médecine en Europe.

C'est à partir du début du XII^e siècle que les traductions s'accélérent grâce aux conditions créées par la reconquête de Tolède par les Castillans. Des dizaines

d'ouvrages traitant de toutes les disciplines (non seulement celles que nous avons évoquées dans ce livre, mais également d'autres comme l'optique, la philosophie, la musique) ont connu une version latine ou hébraïque (ou les deux à la fois). Ce phénomène s'est poursuivi jusqu'au xv^e siècle, au hasard de la disponibilité des manuscrits arabes. Il a été accompagné par d'autres initiatives dont il n'est pas toujours possible de suivre le déroulement, mais dont les résultats sont bien tangibles : il s'agit de dizaines d'ouvrages scientifiques écrits directement en latin ou en hébreu par des auteurs qui n'ont pas jugé bon de traduire des textes. Maîtrisant l'arabe dès leur jeune âge et ayant étudié, dans cette langue, des traités écrits en Andalus, ils ont publié leurs propres manuels. C'est le cas, au début du xiii^e siècle, de Leonardo Fibonacci, qui s'était initié aux mathématiques, d'abord à Bejaia, dans le Maghreb central, puis en Syrie. Le contenu de son principal ouvrage,

Liber abaci, est constitué en grande partie d'éléments de la tradition arabe complétés par les contributions de l'auteur.

Comme il n'est pas possible de présenter dans le détail ce qui est parvenu en Europe des différentes disciplines évoquées dans ce livre, nous nous contenterons d'en illustrer quelques aspects afin d'en montrer la richesse et la diversité.

En ce qui concerne les mathématiques et leurs domaines d'application (comme l'optique et la mécanique), en plus des œuvres maîtresses de la géométrie grecque, ce sont essentiellement des écrits d'auteurs orientaux des IX^e et X^e siècles qui ont été traduits. Les plus importants, dans le sens où ils ont été appréhendés comme un savoir nouveau, sont les traités d'algèbre d'al-Khwârizmî et Abû Kâmil, *Le Livre de la figure sécante* de Thâbit Ibn Qurra, le livre d'optique d'al-Kindî et, surtout, celui d'Ibn al-Haytham. Ce dernier ouvrage a profondément influencé les physiciens du

Moyen Âge latin, et tout spécialement Roger Bacon. Il faut également mentionner les nombreux écrits sur la science du calcul, et particulièrement *Le Livre sur le calcul indien* du même al-Khwârizmî, dans lequel les Européens ont découvert, pour la première fois, le système décimal positionnel indien avec les neuf chiffres et le zéro qu'ils ont par la suite baptisés, incorrectement, « chiffres arabes ».

En astronomie, ce sont les manuels sur les instruments qui ont été connus les premiers. Parmi eux, on peut citer, pour le x^e siècle, *Le Livre de la sphère* de Qusta Ibn Lûqâ, les traités sur l'astrolabe d'al-Majrîtî et d'Ibn as-Saffâr et celui sur l'astrolabe universel d'az-Zarqâlî, qui a connu deux versions, l'une en hébreu et l'autre en castillan. Les aspects mathématiques de l'astronomie théorique ont circulé à travers la traduction en latin, au XII^e siècle, du *Livre de la guérison* d'Ibn Sînâ et, surtout, de *La Révision de l'Almageste* de Jâbir Ibn Aflah.

Quant aux modèles planétaires élaborés aux XIII^e et XIV^e siècles à Maragha et à Damas, aucun livre traduit ne les contenait, mais les analyses comparatives de ces dernières décennies ont montré que des astronomes européens du XVI^e siècle, et en particulier Copernic, étaient au courant de certaines de leurs caractéristiques, comme l'utilisation du « couple d'at-Tûsî » et du seul mouvement uniforme pour réaliser des modèles de la Lune et de Mercure.

En relation étroite avec l'astronomie, l'astrologie arabe a eu en Europe un succès aussi important sinon plus, à en juger par les nombreux traités traduits. On peut même affirmer que ces traductions ont été le point de départ de la tradition astrologique européenne. Les auteurs les plus sollicités ont été Abû M'shar, du VII^e siècle, et Mâshâ'allâh, du VIII^e. Au total, trente-deux de leurs écrits ont connu une version latine et ce sont les meilleurs traducteurs du XII^e siècle, comme Gérard de Crémone et

Jean de Séville, qui se sont chargés de cette entreprise. L'une des traductions faites par ce dernier, *Le Livre des naissances* d'Ibn al-Farrukhân, est d'ailleurs restée le best-seller de la littérature astrologique en Europe jusqu'au XVI^e siècle.

Les recherches sur la géographie ne sont pas encore assez développées pour pouvoir tirer des conclusions sûres à propos des emprunts qui ont pu être faits aux différents travaux arabes dans ce domaine. Ceux qui se sont penchés sur ce sujet signalent un phénomène d'évolution des cartes européennes à partir du XII^e siècle qui suggère des influences, mais sans que l'on puisse en décrire le processus. Ainsi, il semblerait que la connaissance de la fameuse carte d'al-Idrîsî aurait abouti, au XIII^e siècle, à l'abandon des cartes qui représentaient la Terre sous la forme symbolique des lettres T et O (le disque terrestre étant représenté par un O divisé par le T en trois parties : l'Asie au-dessus du

trait horizontal, l'Europe à gauche du trait vertical et l'Afrique à droite, le T lui-même représentant des fleuves, comme la Volga, et des mers). Un autre élément joue en faveur de ces influences : la modification du tracé de l'Afrique dans les cartes européennes à partir du XIV^e siècle. Il y a enfin les témoignages des navigateurs portugais du XV^e siècle qui laissent supposer qu'ils ont fait des emprunts aux cartes arabes de l'époque, en particulier en ce qui concerne le tracé des côtes de l'océan Indien.

En médecine, l'entrée d'une partie du corpus arabe dans l'enseignement européen s'est faite grâce à l'initiative de Constantin l'Africain. Bien que tous les ouvrages qu'il a publiés portent son nom, nous savons aujourd'hui que ce sont tous des versions latines de traités écrits au X^e siècle soit à Bagdad, comme ceux de Hunayn Ibn Ishâq et al-Majûsî, soit à Kairouan, comme ceux d'Ishâq al-Isrâ'ilî, Ibn 'Imrân et Ibn al-Jazzâr. Les traductions se sont poursuivies aux XII^e

et XIII^e siècles et ont permis de mettre à la disposition des professeurs et des praticiens des ouvrages aussi importants que *Le Canon de la médecine* d'Ibn Sînâ, *Le Livre Mansûrî* d'ar-Râzî, *L'Aide-Mémoire des opthtalmologues* d'Alî Ibn 'Îsâ et le fameux chapitre de chirurgie extrait du traité d'az-Zahrâwî.

La mécanique n'a pas connu de traductions permettant aux Européens d'en découvrir les aspects technologiques : il semble qu'ils y soient parvenus d'une manière directe, à partir de l'observation ou de la collecte d'informations. Ainsi, certaines technologies dans les domaines de la guerre, de l'irrigation ou des moulins ont fini par être maîtrisées et utilisées. Pour les aspects théoriques, un seul écrit a bénéficié d'une version latine : *Le Livre du qarastûn* de Thâbit Ibn Qurra, qui traite du moment statique d'une barre homogène. Quant aux ouvrages sur les automates, aucun n'a eu la faveur des traducteurs (à

supposer d'ailleurs que des copies aient été disponibles à Tolède).

La chimie est l'une des disciplines (avec le calcul indien, l'algèbre et l'astrologie) qui s'est constituée en Europe essentiellement à partir de la tradition arabe. Du corpus ésotérique, les traducteurs ont retenu, aux côtés d'un grand nombre d'ouvrages de Jâbir Ibn Hayyân, dont *Le Livre de la divination* et *Le Livre de la miséricorde*, des écrits moins prestigieux, comme *La Table d'émeraude* d'Ibn Umayl. Ils ont également traduit des textes appartenant à la tradition de la chimie opératoire, comme *Le Livre des secrets* d'ar-Râzî et *Le Livre des aluns et des sels* d'un anonyme andalou. À partir de ce double héritage, riche mais souvent hermétique en raison de sa terminologie et, surtout, de ses aspects ésotériques, les passionnés de chimie tentèrent d'abord d'y voir plus clair, puis de travailler dans le prolongement de la tradition arabe; ils ont même été jusqu'à produire des dizaines

de textes de chimie de même facture et attribués à des auteurs musulmans. Mais, en dehors du champ ésotérique, l'originalité des chimistes européens a été plus visible, en particulier avec la maîtrise des techniques de distillation, qui ouvrit la voie à une chimie novatrice.

Conclusion

Au terme de ce rapide survol des aspects essentiels ayant caractérisé l'âge d'or de la science arabe, il est naturel de s'interroger sur les raisons qui ont pu être à l'origine du phénomène de déclin de la civilisation arabo-musulmane et, par voie de conséquence, de celui des activités scientifiques. Il faut tout de suite dire que, pour différentes raisons, en particulier celle de l'insuffisance des recherches sur certains aspects de cette civilisation, il n'y a pas de réponse globale à cette question. Mais il est néanmoins possible de repérer quelques-uns des facteurs qui ont été à l'œuvre dans ce long processus, dont les premières

manifestations apparaissent dès la fin du XII^e siècle.

Parmi les facteurs externes, il y a eu d'abord les offensives chrétiennes contre les territoires contrôlés par les musulmans : les croisades, qui se sont déroulées de la fin du XI^e à la fin du XIII^e siècle, et les opérations de reconquête dans la péninsule Ibérique et en Sicile. Une première conséquence concrète de ces événements a été un rétrécissement de l'espace géographique de l'Empire (avec la perte définitive de la Sicile puis de Tolède et l'instauration du royaume de Jérusalem). Comme on le sait, la Reconquista s'est poursuivie, avec des hauts et des bas, jusqu'à la chute de Grenade en 1492. Au niveau des activités scientifiques, ce sont d'abord celles de la Sicile qui ont disparu rapidement, puis celles d'al-Andalus qui ont commencé à décliner au XII^e siècle, avant de disparaître complètement à la fin du XV^e.

Le deuxième facteur que l'on peut identifier est tout à fait pacifique puisqu'il

est de nature économique : il s'agit de l'effritement progressif du monopole musulman sur le commerce méditerranéen (monopole qui s'est exercé entre le IX^e et le XI^e siècle), accompagné du contrôle de ce commerce par les villes marchandes italiennes (Venise, Gênes, Pise, Florence...). Ses effets sur le phénomène général de déclin ont été lents, mais déterminants.

Le troisième facteur externe a eu un impact psychologique beaucoup plus important que les deux premiers sur les populations de l'Empire musulman, à cause de la brutalité des événements qui l'ont caractérisé et de leur impact sur l'opinion de l'époque : il s'agit des invasions mongoles qui ont commencé au début du XIII^e siècle, sous la direction de Gengis Khan, et se sont déroulées, en plusieurs vagues, jusqu'à la fin du XIV^e siècle, avec les offensives de Tamerlan. Dans une première phase, elles ont entraîné une désorganisation complète des réseaux scientifiques d'Asie centrale.

Mais l'islamisation du pouvoir mongol a néanmoins permis un renouveau de certaines activités, comme l'astronomie, avec la redynamisation de foyers scientifiques anciens, en particulier Tabriz et Samarkand.

Quant aux facteurs internes qui ont pu indirectement favoriser ou accélérer le ralentissement des activités scientifiques, ils sont d'abord d'ordre économique. En effet, le modèle de développement sur lequel ont globalement reposé la prospérité de l'Empire musulman et sa puissance – et qui était essentiellement construit sur un quasi-monopole du commerce international à grand rayon d'action – a commencé à montrer des signes d'essoufflement à partir du XII^e siècle. Parallèlement à la remise en cause de ce monopole par les villes italiennes, des perturbations plus ou moins profondes des circuits commerciaux internes se sont fait sentir, à la suite de longues luttes pour le leadership politique. La situation s'est

aggravée avec la raréfaction de certaines matières premières comme le bois, le fer et l'or, entraînant le déclin économique de certaines villes. À tout cela, il faudrait ajouter, parfois, un facteur naturel que l'on évoque rarement et dont les effets n'ont pas été encore convenablement analysés : celui des grandes épidémies de peste et de choléra qui se sont déclarées au XIV^e siècle, c'est-à-dire au plus mauvais moment pour certaines régions de l'Empire musulman, comme le Maghreb, puisque le processus de déclin y était plus engagé qu'ailleurs.

Il est également intéressant d'observer, mais sans pouvoir en tirer, pour le moment, des conclusions satisfaisantes, que le conservatisme, tant sur le plan religieux qu'idéologique au sens large, a accompagné tous les phénomènes de déclin que nous venons de décrire brièvement et s'en est nourri jusqu'à ce qu'il se soit suffisamment répandu, c'est-à-dire à partir du XV^e siècle. À ce moment-là, il a pu, à son tour,

influer directement ou indirectement sur les orientations des activités scientifiques et sur leur nature. Ce sont des pratiques, des débats et des réflexions d'hommes de science de cette époque qui nous autorisent à émettre cette hypothèse.

Il faut enfin préciser que le déclin de la science arabe n'a pas été uniforme dans l'espace et dans le temps. L'immensité de l'Empire et les spécificités politiques de ses régions ont permis des situations contrastées : le ralentissement des activités scientifiques en Andalus a profité au Maghreb, qui a lui-même connu une réactivation significative dans ce domaine entre les XII^e et XIII^e siècles. C'est un phénomène analogue que l'on a observé avec le renouveau de l'astronomie à Damas et au Caire, au XIV^e siècle, puis à Samarkand, au XV^e.

Bibliographie

Ahmad Y. al-Hasan et Donald R. Hill, *Sciences et techniques en Islam*, Paris, Edifra-Unesco, 1991.

Claude Cahen, *L'Islam : des origines au début de l'Empire ottoman*, Paris, Hachette, 1997.

Marie-Thérèse D'Alverny, « Translations and Translators », in Robert L. Benson et Giles Constable (éds.), *Renaissance and Renewal in the Twelfth Century*, Harvard University Press, 1982, pp. 421-452, et University of Toronto press, 1991.

Paule Charles-Dominique, *Voyageurs arabes, Ibn Fadlân, Ibn Jubayr, Ibn Battûta et un auteur anonyme*, Paris, Gallimard, 1995.

Ahmed Djebbar, *L'Algèbre arabe : genèse d'un art*, Paris, Vuibert-ADAPT, 2005.

Ahmed Djebbar, *Une histoire de la science arabe*, Paris, Le Seuil, 2001.

Ahmed Djebbar (Dir.), *Les Découvertes en pays d'Islam*, Paris, Le Pommier, 2009.

Ahmed Djebbar et Marc Moyon, *Les Sciences arabes dans le nord de l'Afrique, astronomie et mathématiques*, Paris, Éditions Grandvaux-Vecmas, 2011.

Danielle Jacquart et Françoise Micheau, *La Médecine arabe et l'Occident médiéval*, Paris, Maisonneuve et Larose, 1996.

Edward Stewart Kennedy, *Studies in the Islamic Exact Sciences*, Beyrouth, American University of Beirut, 1983.

David A. King, *In Synchrony with the Heaven: Studies in Astronomical Timekeeping and Instrumentation in Medieval Islamic Civilization*, Leiden, Boston, Brill; vol. 1: *The Call of the Muezzin*, 2004; vol. 2: *Instruments of Mass Calculation*, 2005.

Paul Kraus, *Jâbir Ibn Hayyân, contribution à l'histoire des idées scientifiques dans l'Islam*, Le Caire, Institut français d'archéologie orientale, 1943, rééd. Paris, Les Belles Lettres, 1986.

André Miquel, articles sur des géographes arabes, in *Dictionnaire de l'Islam : religion et civilisation*, Paris, Albin Michel-Encyclopaedia Universalis, 1997, pp. 393-394, 451-452, 386-387, 615-617.

Emilie Savage-Smith, « Islamic Science and Medicine », in Pietro Corsi et Paul Weindling (éds.), *Information Sources in the History of Science and Medicine*, Londres, Butterworth Scientific, 1983.

Adolf Pavlovitch Youschkevitch, *Les Mathématiques arabes (VIII^e-XVI^e siècles)*, Paris, Vrin, 1976.

LE COLLÈGE

LES CHERCHEURS D'AUJOURD'HUI

NOUS LIVRENT, SIMPLEMENT, CLAIREMENT,
L'ÉTAT DE LEUR SAVOIR

L'ÂGE D'OR DES SCIENCES ARABES

Astronomie, médecine, mathématiques, géographie... autant de domaines dans lesquels la civilisation arabo-musulmane apporta des contributions originales. Non seulement elle assimila les savoirs grec, indien, babylonien, égyptien qu'elle sut transmettre au temps des grandes traductions, mais elle élaborait aussi une grande tradition scientifique proprement arabe, avec de grands noms comme Ibn Sîna (Avicenne), le mathématicien et astronome al-Khwârizmi ou encore le scientifique et polygraphe Al-Bîrûnî, pour ne citer qu'eux...

Revenir sur l'âge d'or des sciences arabes, entre les VIII^e et XIV^e siècles, nous permet de mieux comprendre cet héritage mal connu et de suivre la circulation des savoirs en Méditerranée, depuis la Grèce jusqu'à l'Europe médiévale.

Ahmed Djebbar est professeur émérite de mathématiques et d'histoire des mathématiques à l'université des Sciences et des Technologies de Lille. Il est l'auteur de très nombreux ouvrages, notamment *Une histoire des sciences arabes* (Le Seuil, 2001). Au Pommier, il a dirigé *Les découvertes en pays d'Islam* (2005).



9 782746 506756

www.universcience.fr, rubrique conférences
www.editions-lepommier.fr

Diffusion Belin

090675

10 €