L'ASTROLABE

par Raymond d'Hollander, ingénieur général géographe

INTRODUCTION

Le présent article est la rédaction que nous avons demandée à M. d'Hollander du contenu de la remarquable conférence qu'il a prononcée le vendredi 11 juin au Musée Paul Dupuy de Toulouse, devant des membres de l'Association des Amis de ce Musée et devant des membres de l'A.F.T., réunis en colloque à l'Ecole Nationale du Cadastre à Toulouse.

Lors de deux séjours à Toulouse M. d'Hollander a étudié de façon approfondie les quatre astrolabes du Musée Paul Dupuy ; il a rédigé les résultats de cette étude, qui font l'objet d'une publication conjointe de la Mairie de Toulouse et de l'A.F.T. intitulée "L'astrolabe. Les astrolabes du Musée Paul Dupuy". On peut se procurer cet ouvrage en remplissant le bon de souscription prévu en bas de la plaquette publicitaire diffusée par l'A.F.T. Quelques renseignements sur le contenu de cette publication sont données à la fin du présent article.

Le Comité de rédaction de XYZ

1. L'ASTROLABE PLANISPHÉRIQUE

1.1 Les différents types d'astrolabes

Astrolabe signifie en grec "preneur d'astres" ; aussi le terme est-il utilisé pour désigner différents instruments astronomiques :

- **l'astrolabe de Ptolémée**, qui est une sphère armillaire d'observation,
- **l'astrolabe sphérique**, dont nous évoquerons le principe,
- **l'astrolabe nautique**,
- **l'astrolabe moderne** à bain de mercure, pour les déterminations astronomiques à hauteurs égales,
- **l'astrolabe planisphérique** classique, que l'on peut déduire de l'astrolabe sphérique au moyen de deux projections stéréographiques polaires. Deux astrolabes du Musée Paul Dupuy sont de ce type : celui de l'horloge astrolabique *d'Habrecht* et celui *d'Abù-Bakr*, auquel est consacré l'essentiel de cet exposé. Ces astrolabes comportent des **tympans**, qui ne sont valables que pour une latitude donnée,
- **l'astrolabe-quadrant** est la réduction à l'un de ses quarts de l'astrolabe planisphérique,
- **l'astrolabe universel** valable pour toutes les latitudes, de type **saphaea** ou astrolabe **catholique**, dont le Musée Paul Dupuy possède un exemplaire, gravé sur l'une des faces du quart de cercle de *Descrolières*, unique en son genre. L'autre face de ce quart de cercle comporte un autre astrolabe universel à **table des horizons**.

1.2 L'astrolabe planisphérique d'Abù-Bakr ; ses principaux éléments constitutifs

Le corps de l'astrolabe *d'Abù-Bakr* est constitué d'un plateau circulaire de 3 mm d'épaisseur et d'environ 13 cm de diamètre, en laiton et argent, plat d'un côté, qui correspond au **dos** de l'instrument, creusé de l'autre côté en une cavité cylindrique appelée "**mère**", destinée à recevoir sept disques portant sur chacune de leurs faces un **tympan**, valable pour une latitude donnée. Six disques comportent douze tympans astronomiques, s'échelonnant de la latitude de La Mecque, $\varphi = 21°40'$ à celle de Saragosse $41°30'$.

Le septième disque est gravé recto-verso de deux tympans astrologiques.

La figure 1 extraite de la Revue **l'Olifant**, publiée par l'Association des Amis du Musée Paul Dupuy, représente un éclaté où cinq disques sont engagés dans la mère et immobilisés par des tenons s'encastrant dans une sorte de mortaise ; deux disques ont été dégagés de la mère. On place au dessus le tympan correspondant à la latitude d'utilisation et l'on recouvre l'ensemble par **l'araignée**, que l'on fixe avec une clavette engagée dans la fente de **l'essieu**, qui traverse de part et d'autre l'instrument, y compris **l'alidade**.

La couronne en saillie de la mère comporte un **limbe** gradué en degrés dans le sens horaire, dont le zéro se trouve sous l'anneau de suspension et correspond au méridien supérieur.

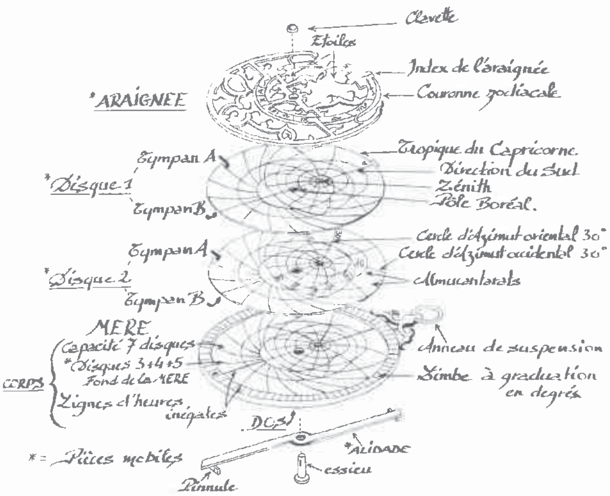

fig 1 Les différents éléments constitutifs d'un Astrolabe démonté (Rd'HOLLANDER)

Dessin : Debrue Benoit

FIGURE 1

L'astrolabe doit être tenu avec une main verticalement, le plan du plateau étant dirigé dans le plan vertical de l'astre, un ou deux doigts de la main passant à travers l'anneau de suspension prévu à cet effet.

L'alidade est munie de deux **pinnules** comportant chacune un trou appelé **œilleton**, permettant de **pointer** les astres. Pour pointer une étoile, on place l'œil contre la pinnule inférieure et avec l'autre main, on tourne l'alidade jusqu'à voir l'étoile à travers l'œilleton de la pinnule supérieure. Pour pointer le soleil on fait tourner l'alidade jusqu'à ce que les rayons du soleil, traversant les deux œilletons, forment une tache lumineuse sur un support placé sous la pinnule inférieure.

2 LA SPHERE CÉLESTE LOCALE ; LE TYMPAN CORRESPONDANT

Considérons un lieu donné de **latitude** φ et en ce lieu un observateur O : construisons une sphère de rayon quelconque ayant O pour centre. Soit (HH') le grand cercle de cette sphère, parallèle à l'horizon du lieu ou à la surface d'un liquide au repos ; on appelle ce grand cercle le **cercle horizon** du lieu (fig. 2).

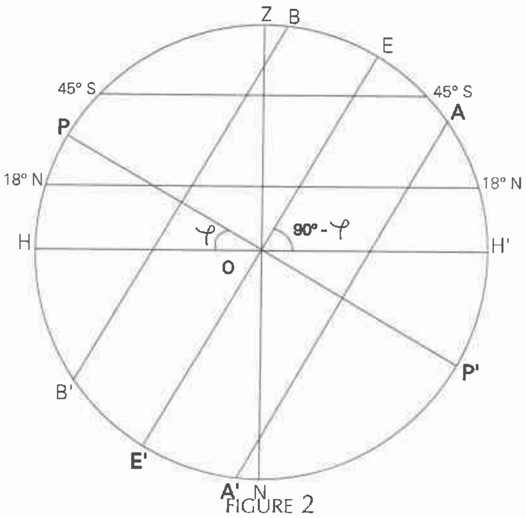

FIGURE 2

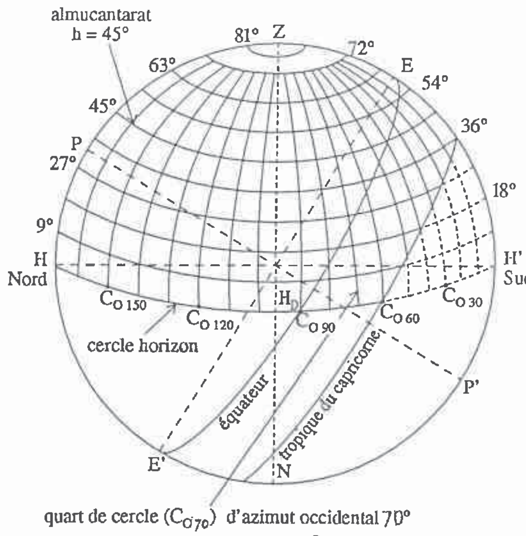

FIGURE 3

L'axe du monde autour duquel s'effectue la rotation apparente de la sphère céleste étoilée perce la sphère locale en deux points P et P'. P est le **pôle céleste boréal**, P' le **pôle céleste austral**.

Par définition la **latitude** φ du lieu est l'angle que fait PP' avec le plan horizontal (HH') ; c'est aussi la **hauteur**[1] du pôle P au dessus de l'horizon. Pour fixer les idées nous prendrons le cas de φ = 31°, latitude de Marrakech, ville où a été réalisé l'astrolabe *d'Abû-Bakr* (fig 2)

Considérons la verticale du lieu passant par O ; elle perce la sphère locale considérée en deux points Z et N : Z correspondant à la verticale ascendante est le **zénith**, N correspondant à la verticale descendante est le **nadir**. Le plan vertical qui contient l'axe PP' et la verticale ZN est appelé plan **méridien** du lieu O ; il coupe la sphère céleste locale selon un grand cercle appelé **cercle méridien** du lieu, situé dans le plan de la figure 2. Dans ce plan la direction de Z vers P est le **Nord**, la direction opposée le **Sud**.

Sur cette sphère considérons toute une série de cercles parallèles à (HH') de hauteurs (1) : 3°, 6°, 9°, 12°, 15°, 18°... 45°... ; seuls les cercles de hauteurs 18° et 45° sont représentés sur la fig. 2 par leurs diamètres 18° N -18° S et 45° N - 45° S ; ce sont les **cercles de hauteurs égales** ou **almucantarats** ; nous les avons représentés à raison de 1 sur 3, c'est-à-dire écartés de 9° sur la fig. 3.

Sur cette même figure nous avons représenté aussi une série de quarts de grands cercles passant par ZN, écartés de 10 en 10° par rapport au méridien ; ce sont les **cercles d'égal azimut**[2] Ouest, situés en avant du méridien pris comme plan de figure, en arrière duquel se trouvent les cercles d'azimut Est. Revenons à la figure 2 et considérons le grand cercle (E'E), appelé **équateur céleste**, qui divise la voûte céleste en deux hémisphères : **l'hémisphère boréal** et **l'hémisphère austral**. Traçons parallèlement à (E'E) le cercle BB' représentant le **tropique céleste du Cancer** et le cercle AA' représentant le **tropique céleste du Capricorne**, ces deux cercles ayant respectivement pour **déclinaisons**[3] : +ε et -ε. L'angle ε est appelé **obliquité de l'écliptique** ; nous y reviendrons ci-après.

La sphère que nous venons de décrire est appelée **sphère céleste locale** parce que ses éléments sont liés à la position du lieu O sur le globe terrestre. Les coordonnées **hauteur** et **azimut** d'un astre sont dites **coordonnées locales** de cet astre ; on peut les mesurer au théodolite.

2.1 Tympan astronomique correspondant à la latitude φ = 31°

Reprenons la coupe de la sphère céleste locale de la fig 2 et reportons la fig 4a. Le tympan de latitude φ = 31° sera obtenu par une **projection stéréographique** de la sphère locale à partir de P' (pôle céleste austral) sur le plan de l'équateur (E'E). La projection stéréographique du point A' s'obtient en joignant P'A' et en prenant l'intersection de cette direction avec E'E ; soit **a'** ce point, en adoptant la règle selon laquelle les projections stéréographiques sont désignées par les lettres minuscules, homologues des lettres majuscules désignant les points sur la sphère.

(1) On appelle hauteur d'un astre S l'angle que fait la direction OS avec le plan de l'horizon
(2) On appelle azimut d'un astre S l'angle que fait le plan vertical passant par l'astre avec le plan du méridien supérieur ; à l'astrolabe on compte les azimuts de 0 à 180°, à l'Est ou à l'Ouest par rapport au Sud.
(3) On appelle déclinaison d'un astre sa distance sphérique à l'équateur, comptée positivement dans l'hémisphère céleste boréal et négativement dans l'hémisphère céleste austral

Cette propriété s'applique aussi bien au cercle horizon, à l'équateur, à l'écliptique, aux cercles d'égal azimut qui sont des grands cercles, qu'aux tropiques, aux almucantarats qui sont des petits cercles.

Enfin la projection stéréographique est **conforme** ; cela signifie que les angles formés par les courbes tracées sur la sphère sont conservés en projection.

Ainsi donc toutes les courbes qui apparaissent sur le tympan de la fig 4b sont des cercles. Des lignes de rappel en tiretés permettent de voir la correpsondance entre les diamètres aa', ee', bb', 18-18', 45-45' de la coupe de la sphère locale de la figure 4a et les points homologues du tympan de la fig 4b ; nous avons procédé de même pour bien marquer la correspondance entre les points h, p, z des figures 4a et 4b.

La figure 4b est la reproduction du tympan de Marrakech de l'astrolabe *d'Abù-Bakr* du Musée Paul Dupuy, où nous avons remplacé les caractères koufiques par des désignations françaises et des chiffres "arabes". Nous avons aussi simplifié le dessin du limbe, gradué seulement de 5 en 5° ; nous avons ajouté autour de celui-ci un limbe gradué en heures, les graduations de 5 en 5° du limbe intérieur correspondant à des subdivisions de 20 en 20 minutes du limbe horaire.

2.12 Courbes situées au dessous du cercle horizon

2.121 La ligne crépusculaire

La ligne crépusculaire est l'almucantarat de hauteur - 18°, les Arabes admettant que la fin du crépuscule a lieu lorsque le soleil a la hauteur -18° au dessous de l'horizon.

2.1.2.2 Les lignes des heures inégales

Les lignes numérotées en chiffres romains I, II, III, IV, V etc... sont les lignes des **heures inégales**, que l'on peut opposer aux heures "égales", reglées sur la trajectoire complète du soleil en 24 heures. Nous avons mis égales entre guillements car nous verrons ci-après, à propos de l'équation du temps, que ces heures ne sont pas rigoureusement égales. Il est **midi solaire** lorsque le **soleil vrai** culmine (passage au méridien supérieur), il est minuit solaire lorsque le soleil vrai passe au méridien inférieur.

Entre ces deux passages, l'heure solaire, celle que l'on obtient à l'astrolabe ou avec les cadrans solaires est mesurée par **l'angle horaire du soleil vrai** Hv (voir fig 14a).

Le temps solaire ainsi défini n'est pas identique à celui de nos montres pour deux raisons :

a) le temps de nos montres est un temps moyen Hm, basé sur un soleil fictif, parcourant l'équateur céleste d'un mouvement uniforme au cours de 'lannée, alors que le soleil vrai se déplace sur l'écliptique selon un mouvement non uniforme (loi des aires de *Képler*). Il y a entre Hm et Hv une différence : E(t) = Hm - Hv, appelée équation du temps, qui selon les périodes de l'année peut varier de +15 à -16 minutes. Le temps moyen de Greenwich sert à définir le temps universel : TU. Il est midi TU lors qu'un soleil fictif culmine au méridien de Greenwich ou **méridien international**. **L'heure légale** française, la même sur tout le territoire national, se déduit du temps universel en ajoutant une heure en automne, hiver et deux heures au printemps et en été.

b) Il faut tenir compte en outre de la différence de longitude du lieu considéré O par rapport au méridien international.

Supposons qu'il soit midi solaire à Strasbourg : il n'est que 11h30m heure solaire à Greenwich ; si on prend le cas où l'équation du temps est nulle ou négligeable il est à cet instant 11h30m TU. Il y a donc à Strasbourg entre les 12 h solaires et l'heure légale 13h30m un décalage de 1h30m et non de deux heures comme on le croit généralement ; ce décalage peut selon les périodes de l'été osciller entre 1h24m et 1h36m.

Aux heures égales solaires on oppose les **heures inégales**, utilisées dans l'Antiquité, au Moyen-âge et à la Renaissance. On distingue les heures inégales de jour et de nuit. L'heure inégale de nuit s'obtient en divisant en douze parties égales l'intervalle de temps séparant le coucher du soleil de son lever : il est 0h de nuit lorsque le soleil se couche, 6h inégale de nuit lorsqu'il est minuit (passage au méridien inférieur), 12h inégale de nuit ou 0h inégale de jour lorsque le soleil se lève. Il est 6h inégale de jour à midi (passage au méridien supérieur) et 12 h inégale de jour au coucher du soleil.

Pour tracer les lignes des heures inégales l'astrolabiste divise en 6 parties égales (fig. 4b) :

- les arcs $u_D b'$ et $b'u_G$ situés sous l'horizon,
- les arcs $h_D e'$ et $e'h_G$ " ,
- les arcs $m_D a'$ et $a'm_G$ " ,

et d'autres arcs analogues tracés entre les deux tropiques. En joignant les points homologues I, II, III etc... on obtient les lignes des heures inégales de nuit de Ih à XIh.

On sait qu'au solstice d'été le soleil parcourt dans le mouvement diurne le tropique du Cancer, donc la nuit l'arc $\overset{\frown}{u_D h u_G}$ situé sous l'horizon. Aux équinoxes il parcourt l'équateur, donc la nuit l'arc $\overset{\frown}{h_D e' h_G}$, moitié de sa trajectoire complète : il y a alors égalité de la durée du jour et de la nuit. Au solstice d'hiver le soleil parcourt le tropique du Capricorne et la nuit l'arc $\overset{\frown}{m_d a m_G}$. Or il est clair sur la figure que l'on a :

$\overset{\frown}{u_D h u_G} < \overset{\frown}{h_D e' h_G}, < \overset{\frown}{m_d a' m_G}$.

La nuit la plus courte est celle du solstice d'été, la plus longue celle du solstice d'hiver. Il en résulte que la douzième partie de la nuit d'été est plus courte que la douzième partie de la durée de la nuit d'hiver, d'où le nom donné à ces heures : d'heures inégales, sous-entendu au cours de l'année.

Remarques : on constate que les points $m_G p u_D$ d'une part, les points $m_D p u_G$ d'autre part sont alignés et que la direction $m_G u_D$ est symétrique de la direction $m_D u_G$ par rapport à la $h_G h_D$; d'où l'égalité angulaire $\widehat{m_G p m_D} = \widehat{u_G p u_D}$.
Le premier angle correpsond à la durée du jour solsticial d'hiver (arc intercepté au dessus de l'horizon) ; le deuxième angle correspond à la durée de la nuit solsticiale d'été (arc intercepté au dessous de l'horizon). Il en résulte que la durée du jour solsticial d'hiver est égale à la durée de la nuit solsticial d'été ; de même la durée de la nuit solsticiale d'hiver est égale à la durée du jour solsticial d'été.

Procédons de même pour le point A, autre extrémité du diamètre du tropique du Capricorne situé dans le plan méridien (plan de figure), soit **a** sa projection stéréographique. Le cercle de diamètre aa' limite le champ de l'astrolabe. Il est clair que l'équateur EE' est sa propre projection, les points e et e' étant cofondus avec E et E'. Soit bb' la projection stéréographique du diamètre BB' du tropique du Cancer. Soient n, h, 18, p, 45, z, 45', 18', h' les projections stéréographiques des points N, H, 18° N, P, 45° N, Z, 45° S, 18°S, H', les points n d'une part, 18' et h' d'autre part étant situés en dehors du champ de l'astrolabe.

En faisant tourner de 90° le plan debout (EE') on met en évidence l'ensemble des cercles qui constituent le tympan de latitude 31°, représenté en fig 4b, que nous avons orientée de manière que aa' soit parallèle à la direction homologue de la fig 4a, sur laquelle nous avons représenté seulement les cercles :

de diamètre (aa') image du cercle (AA')

" (bb') " (BB')

" (ee') " (EE')

Il convient de rappeler les propriétés essentielles de la projection stéréographique :

Les images d'arcs de grand cercle passant par le pôle boréal, donc aussi par le pôle austral sont des droites : c'est le cas en particulier des images des cercles horaires passant par PP' ; ces images ne sont pas représentées sur le tympan, mais dans les astrolabes munis d'un **ostensor** tournant autour de p, le biseau de l'ostensor matérialise une droite horaire mobile.

L'image d'un cercle quelconque tracé sur la sphère, ne passant pas par le pôle, est un cercle.

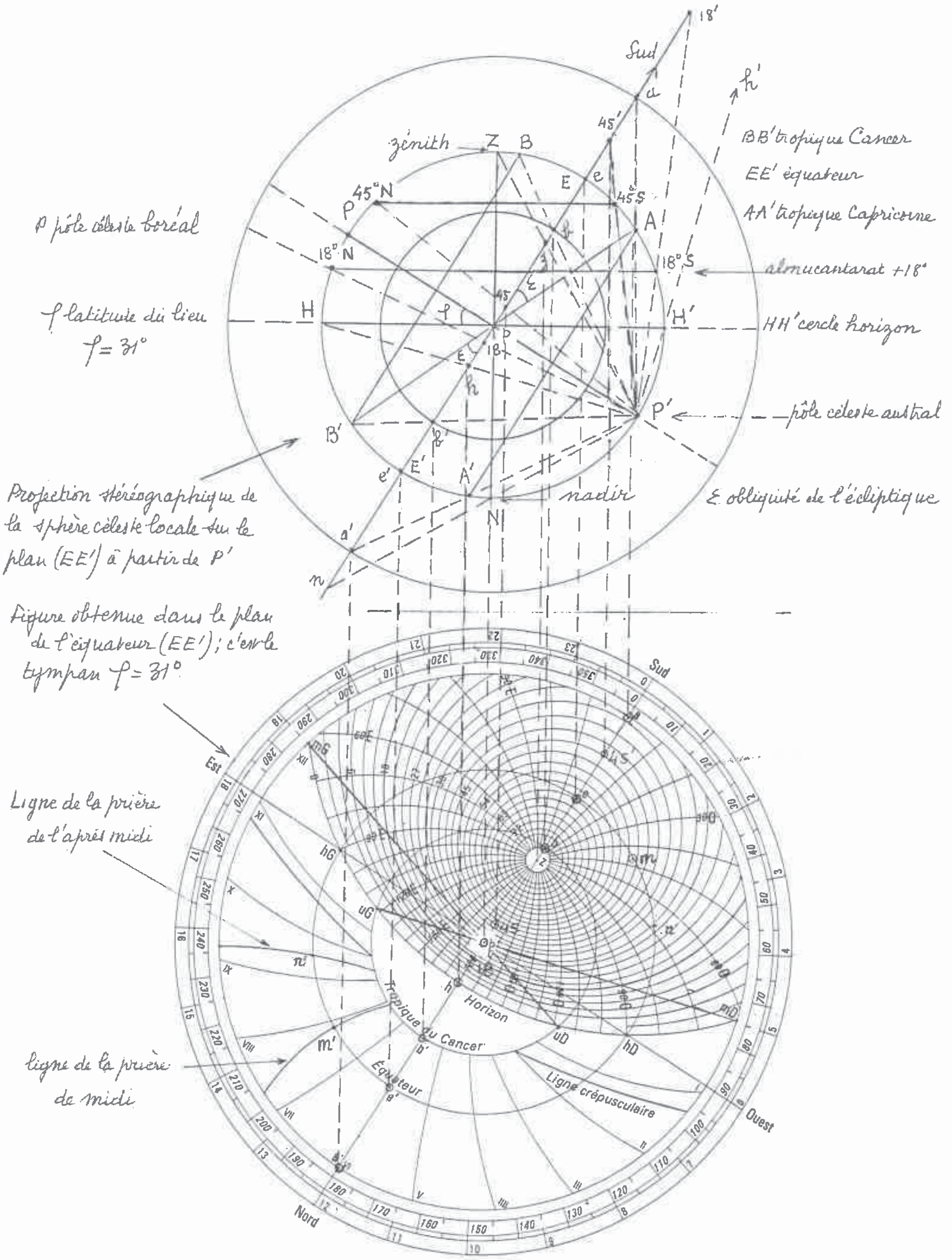

FIGURE 4a

FIGURE 4b

On peut aussi obtenir des résultats numériques. Le point m_D du tropique du Capricorne correspond sur le imbe à la graduation 75° ou 75° + 360° = 435° ; le point m_G du même tropique correspond à la graduation 285°. La longueur du jour solsticial d'hiver (arc au dessus de l'horizon) est donc à Marrakech : 435° - 285° = 150°, soit en heures : 150/15 = 10 heures ; il en résulte que la nuit solsticiale d'été a la même longueur. On en déduit que la durée du jour solsticial d'été, identique à la durée de la nuit solsticiale d'hiver, a pour valeur à Marrakech : 24h -10h = 14h

2.123 Les lignes des heures des prières de midi et de l'après-midi

Les heures des prières musulmanes sont fixées d'après des règles du Coran, mais celles-ci n'ont pas suffisamment de rigueur pour être transposées sur l'astrolabe ; aussi y a t-il plusieurs sortes d'interpretation des lois édictées par Mahomet ; en général elles font référence à la longueur d'ombre du gnomon. Dans les descriptions d'astrolabes musulmans on se contente d'indiquer que la ligne de la prière de midi se trouve située entre les lignes d'heures inégales VII et VIII, c'est-à-dire entre 1h et 2h après la culmination du soleil, et que la ligne de la prière de l'après-midi se trouve située entre les lignes d'heures inégales IX et X, c'est-à-dire entre 3h et 4h après la culmination du soleil. J'ai recherché quelles étaient les deux lois adoptées par *Abù-Bakr* en utilisant une méthode à la fois graphique et calculée.

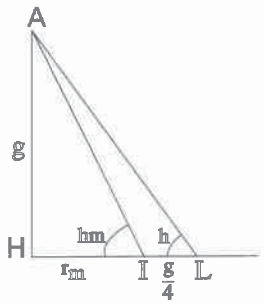

FIGURE 5

L'appel à la prière de midi a lieu lorsque l'ombre : r = HL du gnomon est égale à la somme de l'ombre méridienne r_m (à midi solaire) et du quart de la hauteur du gnomon de hauteur g. On a donc (fig 5) :

$r = HL = r_m + g/4$.

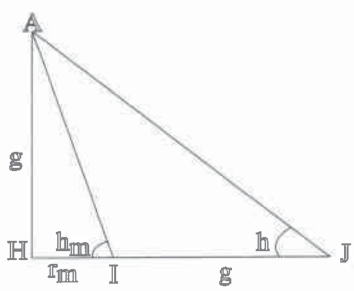

FIGURE 6

L'appel à la prière de l'après-midi a lieu lorsque l'ombre r = HJ du gnomon est égale à la somme de l'ombre méridienne r_m et de la hauteur du gnomon. On a donc (fig 6) :

$r = HJ = r_m + g$

Si l'on trouve assez aisément des textes confirmant la loi de la prière de l'après-midi, il m'a été plus difficile de trouver un texte indiquant la loi adoptée par *Abù-Bakr* pour la prière de midi. C'est dans le "Traité exhaustif des ombres" *d'Al Biruni* (973-1048), traduit assez récemment en anglais par l'Americain *Kennedy* que j'ai découvert cette loi, exprimée de la façon suivante : la longueur de l'ombre méridienne doit s'allonger de trois doigts, c'est-à-dire de 3/12 de la hauteur du gnomon, ce qui correspond bien au quart de sa hauteur.

2.2 Les tympans astrologiques

Outre les douze tympans astronomiques dont les latitudes s'échelonnant de celle de La Mecque à celle de Saragosse, la mère de l'astrolabe comporte deux tympans astrologiques : l'un pour la latitude de Fez, l'autre pour la latitude de Marrakech. La figure 7 représente une reproduction du tympan astrologique de Fez, qui ne comporte aucun almucantarat, ni cercle d'égal azimut, mais à la place sont représentées les limites des **maisons astrologiques** ou **maisons du ciel**, fuseaux de 30° par lesquels les astrologues divisent le ciel pour analyser son état au moment de la naissance d'un enfant et pour dresser son **horoscope.**

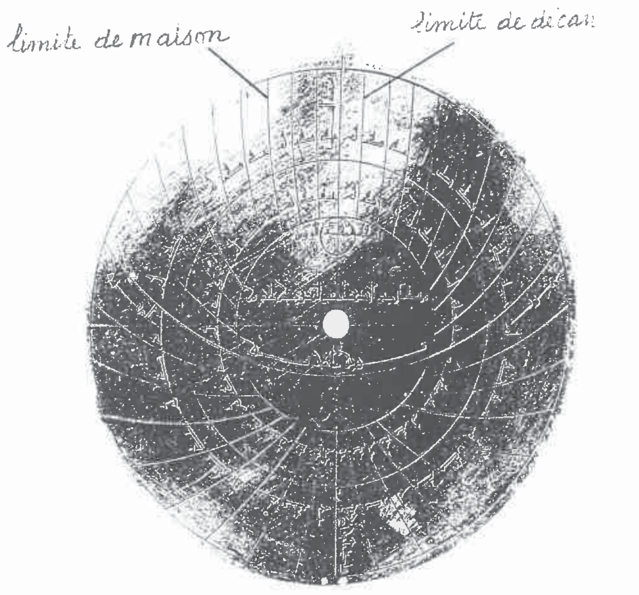

FIGURE 7 Tympan astrologique de Fez (latitude 33° 40')

Différents modes de division du ciel en douze parties égales ou domifications ont été utilisées dans le passé. D'après mon étude *Abù-Bakr* a adopté la **domification** selon la méthode *d'Al Biruni*, déjà cité au paragraphe précédent, et reprise au moyen-âge par *Campanus de Novarre*, astronome italien mort en 1296. Ces deux auteurs divisent le premier vertical, c'est-à-dire le cercle vertical d'azimut 90° Est et Ouest en douze arcs égaux ; chaque maison est divisée en *3 décans*, fuseaux de 10° d'amplitude.

3. La sphere des fixes et l'araignée

3.1 La sphère des fixes (fig 8)

On appelle **sphère des fixes** la sphère céleste étoilée sur laquelle les étoiles sont considérées comme fixes, par opposition au soleil et aux planètes qui se déplacent parmi les étoiles au cours de l'année. La sphère des fixes a le même centre et le même rayon que la sphère céleste locale ; cette dernière reste immobile alors que la sphère des fixes effectue une rotation complète de 360° en 24 heures de temps sibéral ou 23h56m de temps moyen. Sur la sphère des fixes on fait figurer **l'écliptique,** qui est la trajectoire apparente du soleil au cours de l'année. Le plan de l'écliptique fait avec le plan de l'équateur un angle ε appelé **obliquité de l'écliptique**, égal actuellement à 23°26'. De part et d'autre de l'écliptique s'étend le **zodiaque**, partagé en 12 parties égales, appelées **signes du zodiaque**. L'intersection de l'écliptique et de l'équateur est la ligne des points équinoxiaux $\gamma\gamma'$ (fig 8). Le point γ correpsond à **l'équi-**

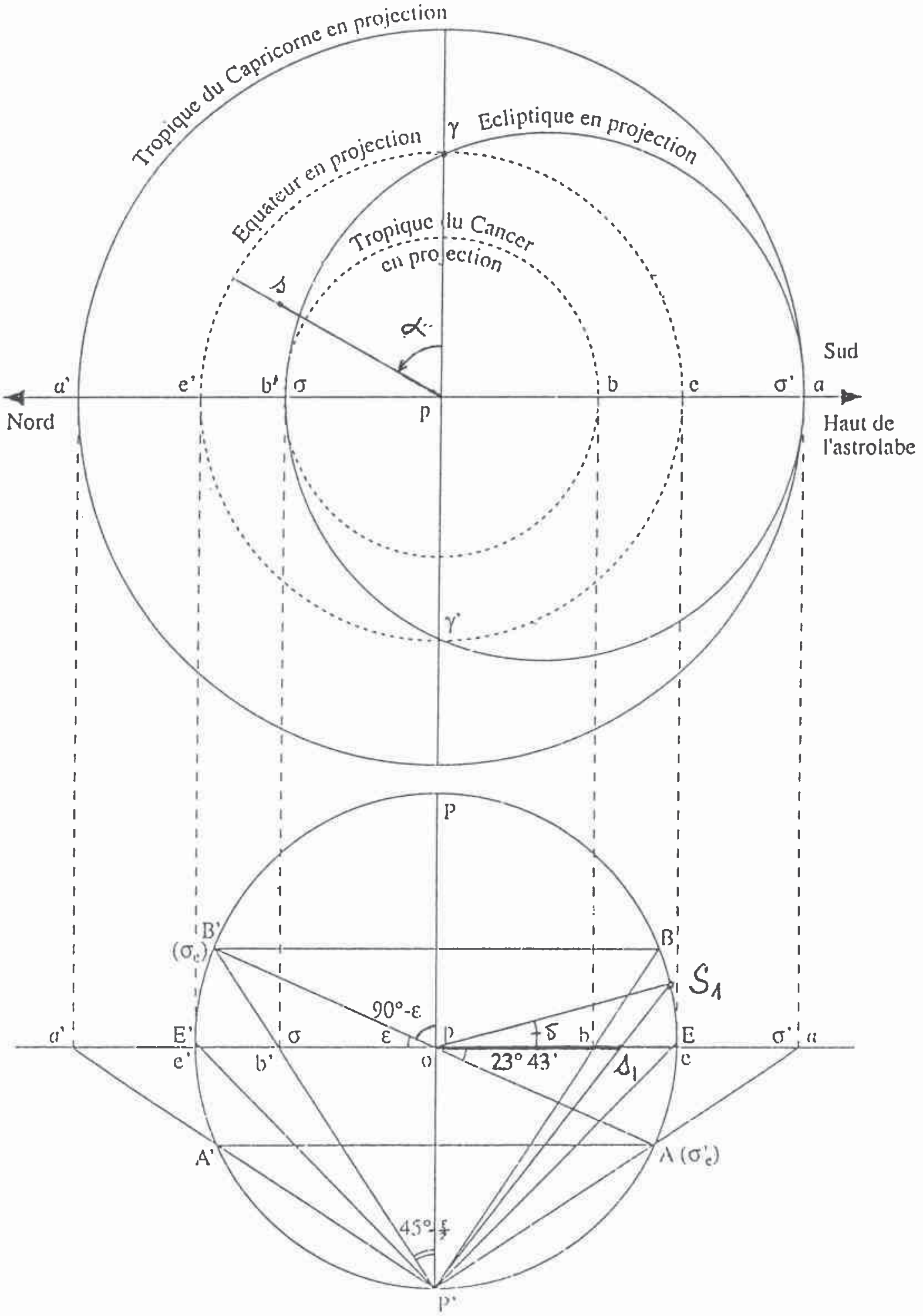

FIGURE 8

Construction de l'araignée par projection stéréographique de la sphère des fixes sur le plan de l'équateur céleste.
Report de l'étoile S par son ascension droite α et sa déclinaison δ : ps = os_1

noxe de printemps et se trouve être au début du signe du Bélier, le point γ' correspond à l'équinoxe d'automne et se trouve être au début du signe de la Balance. Lorsque le soleil se trouv en γ ou γ', donc sur l'équateur il y a égalité du jour et de la nuit, d'où l'origine du mot **équinoxe**.

Sur l'écliptique considérons le point σ de déclinaison égale à $+\varepsilon$, appelé point **solsticial d'été**, situé au début du signe du Cancer ; le **point solsticial d'hiver** σ' lui est diamètralement opposé sur l'écliptique et a pour déclinaison $-\varepsilon$. Lorsque le soleil se trouve en σ la durée du jour est la plus longue de l'année, lorsqu'il se trouve en σ' la durée du jour est la plus courte de l'année.

Au cours de celle-ci, on repère la position du soleil par la **place** qu'il occupe dans un signe du zodiaque, par exemple ♊16° (Gémeaux 16°) ; le point correspondant sur l'écliptique de la sphère des fixes est le **point solaire**. Sur la sphère des fixes les étoiles peuvent être repérées par plusieurs systèmes de coordonnées : coordonnées écliptiques, coordonnées équatoriales : **ascension droite - déclinaison.** La déclinaison a déjà été définie en 2. L'ascension droite est l'angle que fait le cercle horaire de l'étoile (cercle passant par l'étoile et les deux pôles, avec le cercle horaire du point γ défini ci-dessus). Les ascensions droites sont comptées en degrés ou en heures dans le sens direct.

3.2 Araignée

De même que le tympan est la projection stéréographique de la sphère locale, **l'araignée** est la projection stéréographique de la sphère des fixes. La figure 8 indique comment est obtenu la projection stéréographique de l'écliptique AB', tangent en **a** au tropique du Capricorne et en b' au tropique du Cancer ; l'araignée de l'astrolabe *d'Abù-Bakr* comprend en outre la projection stéréographique de 28 étoiles remarquables du ciel. Soit à construire la projection stéréographique s de l'étoile S, *Aldébaran*, d'ascension droite $\alpha = 59°\ 1/4$[(1)] et de déclinaison $\delta = 17°$[(1)] On construit d'abord la direction pi faisant avec pγ l'angle α. Faisons tourner le cercle horaire de l'étoile S de façon à l'amener dans le plan du méridien (plan de figure). L'étoile S vient en S_1, tel que $\widehat{EpS_1} = \delta = 17°$ (fig 8 partie inférieure). Construisons la projection stéréogrpahique s_1 de S_1 ; la longueur os_1 représente la distance polaire en projection de l'étoile ; il suffit de reporter sur la direction pi la longueur $ps = os_1$, pour avoir la projection stérégraphique **s** cherchée.

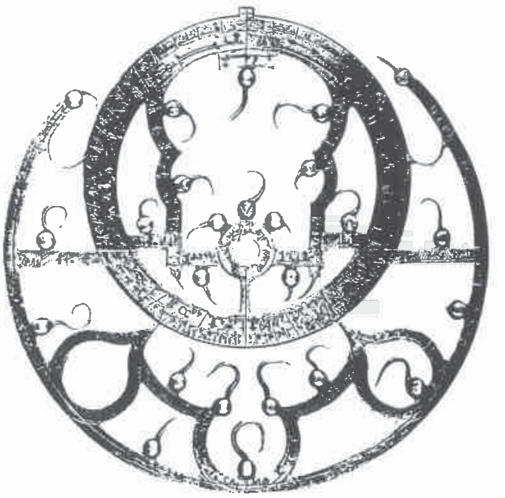

FIGURE 9

En fait les astrolabistes médiévaux utilisaient un autre système de coordonnées : celui de **médiations-déclinaisons**. La médiation d'une étoile est le degré du signe du zodiaque où la direction ps rencontre l'écliptique en projection.

On répète l'opération décrite ci-dessus pour l'ensemble des étoiles de l'araignée. La figure 9 est une photogrpahie de l'araignée de l'astrolabe *d'Abù-Bakr*, qui a une forme ajourée avec des tiges rectilignes ou recourbées assurant la liaison entre la **couronne zodiacale** et la **couronne périphérique**, sur laquelle est tracé partiellement le tropique du Capricorne ; la couronne zodiacale, dont le périmètre est l'image de l'écliptique, porte les 12 signes du zodiaque ; leurs symboles sont accompagnés du nom du signe en arabe et en caractères koufiques ; ils comportent chacun une graduation de 3 en 3° ; l'amplitude des signes du zodiaque est variable à cause de la déformation introduite par la projection stéréographique : l'amplitude est minimale de part et d'autre du point solsticial d'été σ, l'amplitude est maximale de part et d'autre du point solsticial d'hiver σ'.

Sur les tiges ont été placés des rivets qui assurent chacun la fixation d'un crochet dont la pointe terminale matérialise la position d'une étoile ; à proximité du rivet le nom de l'étoile est en caractères koufiques.

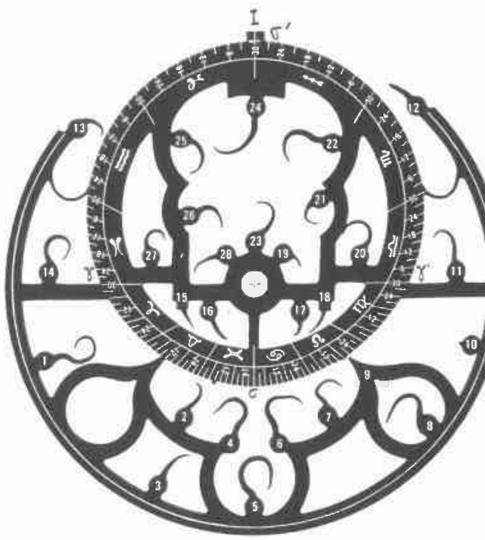

FIGURE 10

La figure 10 représente un dessin de l'araignée, sur lequel nous avons porté à l'emplacement des rivets un n° de 1 à 28. Nous avons dressé une liste de correspondance entre le n° et le nom de l'étoile en arabe d'une part, les noms officiel et usuel de l'étoile d'autre part. Nous ne donnerons pas ici cette liste, mais nous signalons qu'au n° 2 correspond *Aldébaran* prise ci-dessus comme exemple, qu'au n° 5 correspond Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel, qu'au n° 22 correspond Rasalhague que nous utiliserons au n° 6.32.

Au dessus de la graduation 30 du signe du Sagittaire l'araignée comporte un appendice rectangulaire dans l'axe duquel est tracé un trait I que nous désignerons par **l'index de l'araignée**, dont le rôle sera précisé en 6.3.1.

(1) Ces coordonnées sont celles d'Aldébaran lors de la construction de l'astrolabe en 1216-17 ; voir n° 7.2

4. Le dos de l'astrolabe

4.1 Mention de l'auteur et de la date

Autour du centre du dos une inscription en demi-cercle, en caractère koufiques, peut être traduite de la manière suivante : "Fait par Abû-Bakr ben Yusuf dans la ville de Maroc, que Dieu la rende florissante. Année 613". Il s'agit de l'année 613 de l'hégire, soit 1216-17 en calendrier julien, en usage à cette époque, où Maroc désignait à la fois le pays et sa capitale Marrakech.

4.2 Le carrédes ombres

Sous l'inscription précédente figure un **carré des ombres**, dont nous n'avons représenté fig 11 que la moitié de droite, celle de gauche étant sa symétrique par rapport à OC ; il y a donc en réalité deux graduations verticales encadrant une double graduation horizontale, dont la moitié a la même longueur que les deux verticales ; la chifraison comporte les chiffres 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, mais il y a douze traits de graduation aussi bien sur les échelles verticales intitulées "ombre verse" que pour la double graduation horizontale intitulée"ombre gisante". Le carré des ombres a deux fonctions :

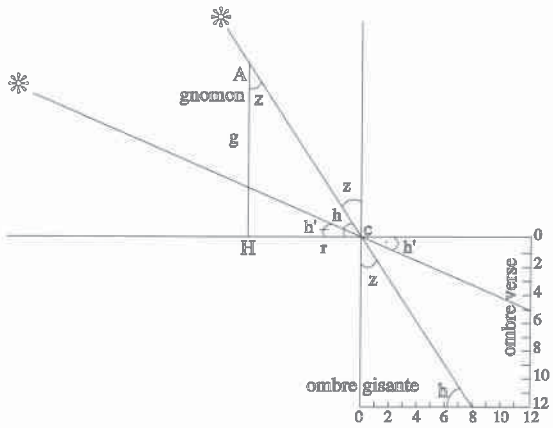

FIGURE 11

a) une fonction liée au soleil permettant de déterminer le **rapport du gnomon**. Toute ville importante dans l'Antiquité disposait d'un gnomon, constitué soit d'une tige verticale, soit d'un obélisque de hauteur g projetant une ombre ou retrait, de longueur r, sur une aire plane et horizontale. Le rapport du gnomon $\frac{g}{r}$ permet de connaitre la hauteur du soleil par la relation : $\tan h = \frac{g}{r}$ voir fig 11 en haut et à gauche. Or si on pointe le soleil avec l'alidade, le biseau de celle-ci rencontre l'une des échelles du **carré des ombres** en une graduation, qui permet d'obtenir le résultat précédent, d'où le nom de carré des ombres donné à ce dispositif. C'est ainsi que la direction AC des rayons du soleil, confondue avec celle du biseau de l'alidade, rencontre l'échelle "ombre gisante" à la graduation 8. Le rapport du gnomon est donc : $\tan h = 12/8 = 1{,}5$, d'où $h = 56°19'$.

L'échelle ombre verse permet la mesure de tan h' lorsque $h' < 45°$; dans le cas de la fig 11 :

$\tan h' = 6/12 = 1/2$, d'où $h' = 26°34'$

b) Le carré des ombres avait aussi une fonction trigonométrique.

Si le biseau comporte la même graduation que les échelles "ombre gisante" et "ombre verse", mais allant au moins jusque $12 \times \sqrt{2}$ unités, on peut, en marquant un angle tel que z sur le limbe du dos de l'astrolabe et en plaçant le biseau sur cette graduation z, obtenir les valeurs des lignes trigonométriques : tan z, sin z, cos z et résoudre un certain nombre de problèmes, tels que ceux qui sont liés à l'arpentage.

4.3 Le calendrier perpetuel d'Abù-Bakr

Autour de la partie centrale qui vient d'être décrite on discerne 10 couronnes circulaires que nous numérotons de l'intérieur vers la périphérie. Les couronnes 1.2.3.4 constituent le **calendrier perpétuel** *d'Abù-Bakr* ; pour passer de celui-ci au calendrier julien il faut retrancher 14 au millésime du calendrier perpetuel, dont l'origine (an 1) remonte à l'an 15 avant la naissance de J.C..

4.4 Le calendrier zodiacal

Les couronnes 5.6.7.8.9 forment le **calendrier zodiacal**, qui indique pour chaque jour de l'année la place qu'occupe le soleil dans l'un des signes du zodiaque. La position correspondante sur l'écliptique de la sphère des fixes s'appelle le **point solaire** ; celle de l'araignée s'appelle aussi le point solaire ; l'examen de ce calendrier nous indique par exemple que :

- le point solsticial d'été, début du signe du Cancer (point σ), se trouve en face de la date du 15 juin, le degré 16 des Gémeaux se trouve en face de la date du 1er juin,
- le point équinoxial de printemps début du signe du Bélier (point γ) se trouve en face de la date 14 mars. Or dans notre calendrier actuel le point γ correspond au 21 mars ; cela mérite une explication.

Dans le **calendrier julien**, établi sous *Jules César*, et encore en vigueur à l'époque *d'Abù-Bakr* la durée moyenne de l'année est de 365,25 jours (3 années normales suivies d'une année bissextile), alors qu'elle est en réalité de 365,2422 jours, d'où un retard de 0,0078 jour par an. Le concile de Nicée avait en 325 fixé l'équinoxe de printemps au 21 mars. En 1216 le retard était de $(1216\text{-}325) \times 0{,}0078 \approx 7$ jours, de sorte que le point vernal correspond à : $21 - 7 = 14$ mars, date que l'on trouve bien sur le calendrier zodiacal.

En 1582 le retard pris par le calendrier julien était de $(1582\text{-}325) \times 0{,}0078 \approx 10$ jours. Pour rattraper ce retard le Pape *Grégoire XIII* décida que le lendemain du jeudi 4 octobre 1582 s"appellerait le 15 octobre 1582 et pour que le nouveau calendrier, appelé **calendrier grégorien**, ne prenne plus de retard, il décida que les années juliennes seraient diminuées à raison de 3 jours tous les 400 ans, soit de 3/400 = 0,0075 jour ; pour ce faire il supprima les 29 février des années 1700,1800, 1900..., 2100 etc..., années dont le nombre de centaines n'est pas divisible par 4 ; ne sont maintenues bissextiles que les années dont le nombre de centaines est divisible par 4, à savoir 1600, 2000 etc...

En ce qui concerne les astrolabes l'examen de leur calendrier zodiacal permet donc, grâce à la date correspondant au point γ, de savoir si le calendrier utilisé est julien ou grégorien. Dans le premier cas l'astrolabe a été construit avant 1582, dans le deuxième cas après 1582.

4.5 Le limbe et les chiffraisons encadrantes

Un limbe gradué de 0 à 360° occupe la couronne n° 9 : il est encadré de deux chiffraisons occupant les couronnes n°8 et n° 10. Dans la couronne n° 8 il s'agit de 12 chiffraisons identiques de 0 à 30° correspondant à chacun des douze signes du zodiaque. Dans la couronne n° 10 on trouve 4 séries de chiffraisons de 0 à 90° permettant de lire sur le biseau de l'alidade la hauteur de l'astre visé.

5. Le fond de la mere

Lorsqu'on enlève l'araignée et tous les tympans, on découvre le fond de la mètre, qui comporte toute une série de **tables astrologiques**, disposées en couronnes circulaires. Ce sont des tables établies selon *Ptolémée*, selon *Alcabitius* ou dans un système dit égyptien.

Ptolémée a vécu à Alexandrie au 2e siècle après J.C ; Alcabitius est un astrologue arabe ayant vécu à Alep et à Mossoul avant l'an 1000.

Ces tables astrologiques constituent un véritable vademecum de l'astrologue.

6. Les usages de l'astrolabe planisphérique

6.1 Principe d'utilisation de l'astrolabe sphérique et de l'astrolabe planisphérique.

Rappelons que le tympan est la projection stéréographique de la sphère céleste locale, qu'on laisse immobile et que l'araignée est la projection stéréographique de la sphère des fixes effectuant un tour complet en 24 heures de temps sidéral ou 23h56m de temps moyen, autour de l'axe PP'. Mettons en contact les deux sphères, celle des fixes étant transparente, de manière que l'on puisse voir à travers elle le double réseau des almucantarats et des cercles d'égal azimut de la sphère locale ; nous venons de réaliser un astrolabe sphérique. La date étant connue nous pouvons grâce au calendrier zodiacal identifier le point solaire sur l'écliptique de la sphère tournante. A chaque instant de la journée, l'heure étant le paramètre connu, on peut connaitre la hauteur du point solaire par interpolation parmi les almucantarats ; on peut connaitre aussi son azimut par interpolation parmi les cercles d'égal azimuit. On peut procéder de même pour les étoiles portées sur la sphère des fixes.

Mais à la place de l'heure on peut prendre comme paramètre connu la hauteur du soleil ou celle d'une étoile mesurée avec l'alidade, et l'on pourra en déduire l'heure comme nous le verrons ci-après (n° 6.31).

Les opérations que nous venons de décrire à l'astrolabe sphérique peuvent être effectuées avec l'astrolabe planisphérique, dont la réalisation est beaucoup plus facile et l'encombrement plus faible. Il suffit de faire tourner l'araignée par rapport au tympan de la latitude du lieu d'observation.

Dans les deux cas : astrolabe sphérique et astrolabe planisphérique il est possible de résoudre les douze problèmes liés au triangle de position ; leur dénombrement fait l'objet du paragraphe suivant, qui n'a pas été traité à la conférence en raison d'une part de son caractère technique et de la présence de membres de l'Association des Amis du Musée Paul Dupuy et d'autre part du temps imparti. Il nous parait quasi indispensable d'exposer cette question dans un article destiné à des topographes.

6.2 La résolution du triangle de position à l'astrolabe

Le triangle de position est constitué sur la sphère céleste locale par :
- le pôle boréal P,
- le zénith du lieu z,
- l'astre visé S (étoile ou soleil).

Les angles du triangle de position sont :

- $\widehat{ZPS} = \widehat{H}$, angle horaire de l'astre,
- $\widehat{PZS} = \widehat{A'} = 180° - Az_0$, Az_0 étant l'azimut Ouest de l'astre S, représenté sur la figure 12,
- $\widehat{ZPS} = \widehat{S}$, angle à l'astre.

Les côtés sont :

- $\overset{\frown}{PZ} = \theta$, colatitude du lieu ; si φ est la latitude, on a : $\theta + \varphi = 90°$
- $\overset{\frown}{ZS} = z$, distance zénithale de l'astre ; si h est sa hauteur, on a : $z + h = 90°$
- $\overset{\frown}{PS} = p$, distance polaire de l'astre ; si d est sa déclinaison, on a : $p + \delta = 90°$

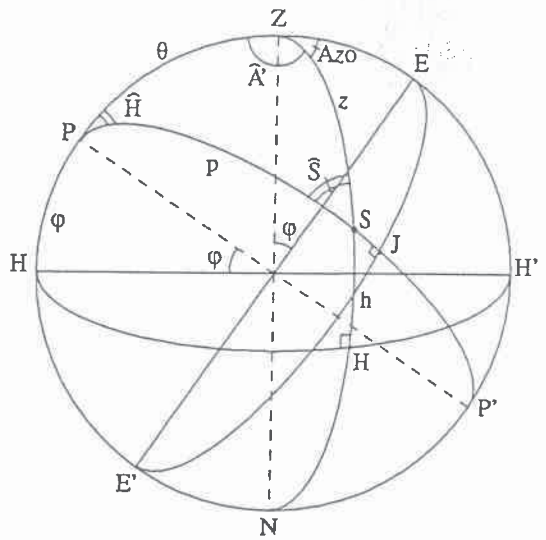

FIGURE 12

J'ai inventorié les différents problèmes pouvant être résolus à l'astrolabe de la manière suivante :

A l'astrolabe l'angle à l'astre S ne présente aucun intérêt, d'autre part la latitude φ, donc aussi la colatitude θ est toujours un élément connu ; on peut l'associer avec les quatre éléments restants de 4 manières différentes, qui sont :

A)	θ	$\widehat{H}$	$\widehat{A'}$	z,
B)	θ	$\widehat{H}$	$\widehat{A'}$	p,
C)	θ	$\widehat{H}$	z	p,
D)	θ	$\widehat{A'}$	z	p.

Pour chaque manière A ou B ou C ou D, on peut, θ étant connu, résoudre trois problèems différents, en se donnant deux des paramètres autres que θ et en calculant le quatrième, d'où le tableau ci-après, dans lequel nous avons utilisé les paramètres, tels qu'ils se présentent dans le triangle de position, mais en faisant figurer à côté, entre parenthèses, le paramètre plus usuel, qui nous intéresse :

$$\varphi = 90° - \theta,$$
$$Az = 180° - \widehat{A}',$$
$$h = 90° - z,$$
$$\delta = 90° - p.$$

		Paramètres astronomiques supposés connus			Paramètre à déterminer
	1	θ (φ)	$\widehat{A}'$(Az)	z (h)	$\widehat{H}$
A	2	θ (φ)	$\widehat{H}$	z (h)	$\widehat{A}'$ (Az)
	3	θ (φ)	$\widehat{H}$	$\widehat{A}'$ (Az)	z (h)
	4	θ (φ)	$\widehat{A}'$ (Az)	p (δ)	$\widehat{H}$
B	5	θ (φ)	$\widehat{H}$	p (δ)	$\widehat{A}'$(Az)
	6	θ (φ)	$\widehat{H}$	$\widehat{A}'$(Az)	p (δ)
	7	θ (φ)	z (h)	p (δ)	$\widehat{H}$
C	8	θ (φ)	$\widehat{H}$	p (δ)	z (h)
	9	θ (φ)	$\widehat{H}$	z (h)	p (δ)
	10	θ (φ)	z (h)	p (δ)	$\widehat{A}'$(Az)
D	11	θ (φ)	$\widehat{A}'$(Az)	p (δ)	z (h)
	12	θ (φ)	$\widehat{A}'$(Az)	z (h)	p (δ)

6.3 Quelques problèmes pouvant être résolus à l'astrolabe

6.31 Détermination de l'heure de jour au soleil - Détermination de l'azimut du soleil

En un lie<u de latitude φ connue, à une date connue, on mesure l'après-midi la hauteur h du soleil.

a) déterminer l'heure de l'observation H_v
b) déterminer l'azimut du soleil Az_0

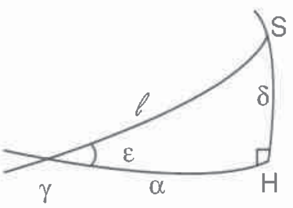

FIGURE 13

Dans ce double problème on connait la latitude φ, la hauteur h du soleil et la déclinaison δ du soleil résultant de la date d'observation ; celle-ci permet en effet de situer le point solaire sur l'écliptique et de connaitre sa déclinaison fonction de sa longitude écliptique l. En effet soit γS une position d'arc de l'écliptique (fig 13) et γH une position d'arc de l'équateur. Dans le triangle sphérique rectangle γ HS on a : $\sin \delta = \sin l . \sin \varepsilon$.

Ainsi la détermination a) correspond au problème n° 7, la détermination b) correspond au problème n° 10 du tableau de recensement de 6.2.

Résolution à l'astrolabe sphérique (fig 14a) :

Dans le mouvement diurne le point solaire décrit le parallèle céleste de déclinaison δ : celui-ci rencontre l'almucantarat (h) au point S, position du point solaire au moment de l'observation. Le cercle horaire de S fait avec le méridien l'angle $\widehat{H}_v$ cherché, qui est l'heure de l'observation. Le cercle d'égal azimut Az_0 passant par S donne l'azimut cherché.

Résolution à l'astrolabe planisphérique (fig 14b) :

a) Soit s le point solaire ; on fait tourner l'araignée jusqu'à ce que le point solaire vienne se placer sur l'almucantarat (h). L'homologue en projection stéréographique du cercle horaire $\widehat{PSP'}$ est la droite ps qui fait avec le méridien py l'angle Hv correspondant à l'heure cherchée.

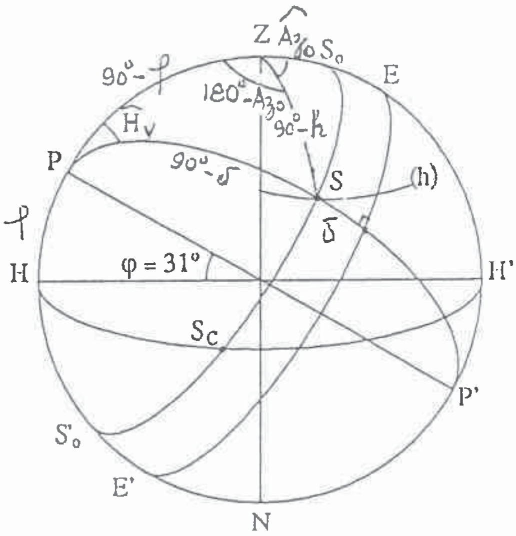

FIGURE 14a

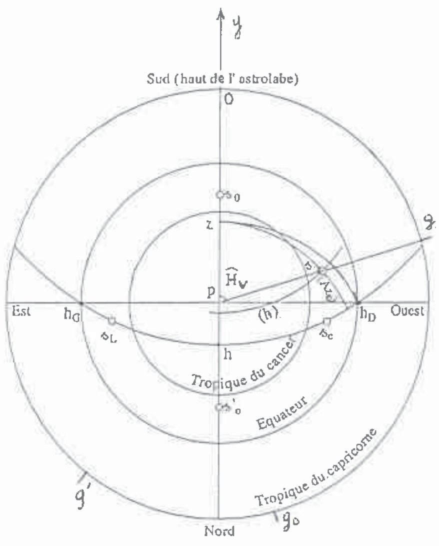

FIGURE 14b

En prenant l'intersection de ps avec le limbe gradué en degrés, qui entoure le tropique du capricorne, on obtient la lecture g. L'arc $\widehat{og}$ donne en degrés l'angle H_v cherché. Pour obtenir celui-ci en heures, il suffit d'écrire : $\widehat{H}_v = \frac{0g°}{15}$, car 1 h = 15°.

Dans la plupart des astrolabes une réglette appelée ostensor, tournant autour de p, permet la lecture de g et même de la lecture directe de l'heure sur un deuxième limbe horaire (voir fig. 4b). Mais l'astrolabe *d'Abù-Bakr* est dépourvu d'ostensor de sorte que l'obtention de l'heure s'opère en deux temps.

On amène d'abord le point solaire sur le méridien supérieur py (culmination du soleil à midi vrai) ; on lit sur le limbe la graduation g_0 correspondant à la position de l'index I de l'araignée (voir fig 10). On amène ensuite par rotation de l'araignée le point solaire sur l'almucantarat (h) et on lit sur le limbe la graduation g' correspondant à la nouvelle position de l'index I. Il est clair que le point solaire a tourné de l'angle $\widehat{g' - g_0} = \widehat{0g}$; l'heure de l'observation est donnée par : $\widehat{H_v} = \dfrac{g' - g_0}{15}$

b) Pour avoir l'azimut du soleil à l'instant de l'observation, il suffit d'identifier le cercle d'azimut Az_0 passant par s.

Exemple numérique. A Marrakech de latitude φ = 31° on observe l'après-midi du 1er juin (calendrier julien) le soleil sous la hauteur h = 25°. Déterminer a) l'heure, b) l'azimut du soleil.

a) On sait que le point solaire correspondant au 1er juin est ♊16° (Gémeaux 16°)

On trouve respectivement après les deux rotations de l'araignée indiquées ci-dessus :

go = 165°, g' = 238°. On a donc :

$$\widehat{H_v} = \frac{238 - 165}{15} = \frac{73°}{15} = 4h52m \text{ de l'après midi}$$

ou $\widehat{H_v}$ = 16h52m

b) Le cercle d'égal azimut qui passe par s est le cercle 103° Ouest, interpolé au 1/3 de l'intervalle entre les cercles d'azimuts ocicdentaux 100° et 110°. Pour avoir la direction du Nord, d'azimut 180°, il suffit de se placer face au soleil, d'effectuer une rotation de 77° dans le sens horaire et l'on sera face au Nord.

Détermination de l'heure inégale. Bien que les lignes des heures inégales ne figurent que sous l'horizon, correspondant à des heures inégales de nuit, on peut déterminer une heure inégale de jour de la manière ci-après. On effectue une symétrie par rapport au pôle p en considérant le **point antisolaire**, diamétralement opposé au point solaire sur l'écliptique ; on détermine la position de celui-ci par interpolation parmi les lignes des heures inégales de nuit, que l'on interprête comme heures inégales de jour en raison de la symétrie effectuée. Dans l'exemple numérique ci-dessus le point antisolaire est ♐ 16° (Sagittaire 16°).

On opère en un seul temps : on tourne l'araignée de manière que le point solaire vienne sur l'almucantarat h = 25°, le point antisolaire se trouve alors sur la ligne des heures inégales interpolée au 1/10 de l'intervalle entre X et XI h : il est donc Xh6m, heure inégale de jour, soit Ih54m heure inégale avant le coucher du soleil, qui se produit à XII h inégales de jour..

6.32 Détermination de l'heure de nuit. Détermination de l'azimut d'une étoile

En un lieu de latitude φ connue, à une date connue, on mesure, côté Est, la hauteur d'une étoile h.

a) Déterminer l'heure de l'observation,

b) Déterminer l'azimut de l'étoile.

a) Il s'agit encore du problème n°7 ; sa résolution donnera l'angle horaire H de l'étoile et non l'heure, mais à l'astrolabe la pointe du crochet de l'étoile présente une certaine différence s'ascension droite avec le point solaire, de sorte qu'en utilisant le cercle horaire du point solaire on obtient directement l'heure.

b) En ce qui concerne l'azimut de l'étoile c'est évidemment le cercle d'égal azimut passant par l'étoile qui donnera l'azimut de celle-ci.

Nous raisonnerons directement sur l'exemple numérique suivant :

Exemple numérique. A Marrakech de latitude φ = 31°, on observe dans la nuit du 1er au 2 juin l'étoile Rasalhague (n° 22 fig 10) du côté Est sous la hauteur h = 51°.

Déterminer : a) l'heure ; b)l'azimut de l'étoile.

a) On fait tourner l'araignée de manière que la pointe du crochet de l'étoile n° 22 vienne se superposer à l'almucantarat 51° côté Est. Le point solaire ♊16° se trouve alors exactement sur la ligne des heures inégales III ; il est donc IIIh inégales de nuit, après le coucher du soleil.

Pour obtenir l'heure égale on amène d'abord le point solaire sur le méridien supérieur et comme dans l'exemple numérique du n° précédent on lit devant l'index I de l'araignée : g_0 = 165° ; on tourne ensuite l'araignée de manière à amener la pointe du crochet de l'étoile n° 22 sur l'almucantarat 51°, l'index I se trouve alors devant la graduation g' = 307°.

Dans cette rotation de l'araignée le point solaire a tourné de l'angle : $g' - g_0$ = 307° - 165° = 142°

de sorte que l'heure de l'observation est :

$$H_v = \frac{142}{15} = 9h28m,$$

après le midi solaire, soit 21h28m.

b) On constate que c'est le cercle d'égal azimut 70° Est qui passe par l'étoile ; l'azimut de celle-ci est donc AzE = 70°. Si on fait face à l'étoile et si on tourne de 70° dans le sens horaire on se trouvera face au Sud.

6.33 Détermination de l'heure et de l'azimut du lever au coucher du soleil

En un lieu de latitude φ et à une date connue quelle est l'heure du coucher du soleil, quel est son azimut.

Application numérique φ = 31°, date 1er juin en calendrier julien.

a) Heure du coucher du soleil le 1er Juin. Nous avons à résoudre un problème correspondant au cas particulier du problème général n° 7 (n° 6.2) où le paramètre h, hauteur de l'astre est nul (voir fig 14 b soleil en s_c sur le cercle horizon). Raisonnons directement sur l'application numérique. Le point solaire est ♊16° ; en amenant ce point sur le méridien supérieur on trouve toujours devant l'index I:g_0 = 165° ; faisons tourner l'araignée de manière à amener le point solaire en s_c sur le cercle horizon côté Ouest, l'index I se trouve devant la graduation g' = 269°. L'heure cherchée est :

$$H_v = \frac{269 - 165°}{15} = \frac{104°}{15} = 6h56m \text{ de l'après-midi ou } 18h56m$$

Il est intéressant de comparer cette heure de coucher du 1er juin avec celle du solstice d'été qui se produit le 15 juin. En amenant le point solaire σ sur le méridien supérieur, l'index I se trouve devant la graduation $g'_o = 180°$; faisons tourner l'araignée de manière à amener le point solaire σ sur le cercle horizon coté ouest ; l'index I se trouve devant la graduation 285°. L'heure du coucher du soleil au solstice d'été est : $H_c = \frac{285 - 180}{15} = \frac{105}{15} = 7h00m$

de l'après-midi où 19h00m.

On en déduit que la durée du jour solsticial d'été est 14h, résultat obtenu directement sur le tympan à la fin du n° 2.1.2.2. Dans les deux cas il s'agit de la durée du **jour théorique** qui ne tient pas compte de la réfraction.

b) Azimut du soleil à son coucher le 1er juin. On trouve que c'est le cercle d'égal azimut 117° qui passe par le point solaire ♊16°.

Azimut du soleil à son coucher au solstice d'été.

On constate que le point u_D situé à l'intersection du tropique du cancer et du cercle horizon (fig 4b) se trouve sur le cercle d'égal azimut 117°.

Ainsi au solstice d'été le soleil à son coucher a encore pour azimut 117°. Celui-ci n'a pas varié du 1er juin au 15 juin, du moins à la précision des lectures à l'astrolabe près ; cela nous permet de comprendre l'origine du mot **solstice** qui vient de l'assemblage de deux mots latins : sol = soleil, stare = s'arrêter. A l'approche du solstice d'été le soleil couchant (il en est de même du soleil levant) ralentit sa course à l'horizon, reste pratiquement au même point de l'horizon pendant plusieurs jours, avant de rebrousser chemin (voir fig 15).

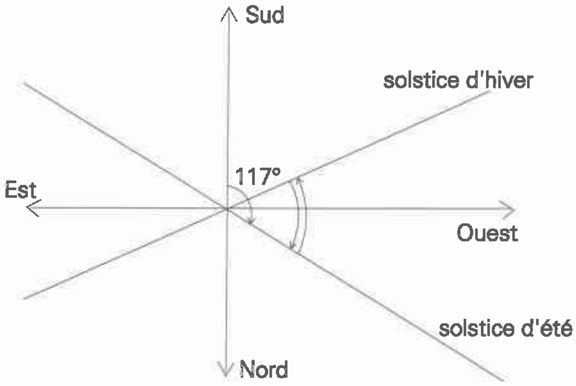

FIGURE 15

6.3.4 Utilisation de l'astrolabe à des fins religieuses

6.3.4.1 Les heures des prières musulmanes

Nous avons indiqué en 2.1.2.3 à quelles lois obéissaient les heures des prières musulmanes. Les lignes des heures des prières de midi et de l'après-midi sont sous le cercle horizon, or ces prières sont récitées de jour, de sorte qu'il est nécessaire d'utiliser le point antisolaire, comme nous l'avons déjà fait précédemment. On amène le point antisolaire, donné par le calendrier zodiacal correspondant à la date d'observation, sur l'une des lignes de prières ; le point solaire se trouve alors sur un almacantarat de hauteur h. Sur son minaret le muezzin place le biseau de l'alidade de manière qu'il marque cette hauteur h sur le limbe du dos de l'astrolabe et il attend que les rayons du soleil descendant traversent les deux œilletons des pinnules pour former une tache lumineuse sur un support placé sous la pinnule inférieure ; à ce moment là il chante l'appel à la prière.

Prenons deux exemples correspondant à des cas particuliers ne nécessitant pas l'utilisation del'araignée de l'astrolabe.

a) Soit à déterminer l'heure de la prière de midi à Marrakech aux équinoxes, où le soleil décrit l'équateur. Sur la figure 4b on voit que la ligne de la prière de midi rencontre l'équateur au point m', point antisolaire. Le point solaire est le point m diamétralement opposé sur l'équateur, qui se trouve à égale distance des almucantarats 48° et 51°, soit h = 49,5°. La hauteur méridienne du soleil aux équinoxes correspond à la hauteur du point E de la fig 2 qui est $90° - \varphi = 90° - 31° = 59°$. Il faudra donc attendre que le soleil passe de la hauteur 59° à la hauteur 49,5°. Le **muezzin** place le biseau de l'alidade de façon qu'il marque sur le limbe du dos de l'astrolabe la hauteur 49,5° et il attend que les rayons du soleil descendant traversent les deux pinnules ; lorsque cela se produit le **muezzin** lance l'appel à la prière de midi. Le tympan de l'astrolabe nous a donné 49,5° ; le calcul donne 49,6068°

b) Soit à déterminer l'heure de la prière de l'après-midi aux équinoxes. Sur la fig 4b on voit que la ligne de la prière de l'après-midi rencontre l'équateur au point n', point antisolaire. Le point solaire est le point n diamétralement opposé sur l'équateur, qui a pour hauteur 32° ; le calcul donne 31,9915°

Le muezzin opère comme en a) et lance l'appel à la prière de l'après-midi lorsque le soleil atteint la hauteur 32°.

6.3.4.2 Le graphique des azimuts de la Qibla

Des astronomes arabes ont résolu de façon très astucieuse le problème de l'orientation vers la Mecque.

En effet contrairement au rite chrétien, dans lequel les chœurs des églises sont orientés vers l'Est, l'un des points cardinaux, le Coran exige que l'orientation des mosquées, celle des fidèles dans leurs prières ait lieu dans la direction de La Mecque et même dans la direction de **la Qibla**, la place centrale de La Mecque. Certains types d'astrolabes comportent, pour les villes d'une certaine importance du monde musulman, un graphique dit des **azimuts de la Qibla**, qui permet à chaque jour de l'année de connaître quelle est, en cette ville, la hauteur du soleil lorsqu'il a le même azimut que la Qibla.

Il suffit alors de placer l'alidade de l'astrolabe de manière que son biseau intercepte sur le limbe du dos de l'astrolabe la hauteur en question et d'attendre que les rayons du soleil traversent les œilletons des deux pinnules, pour être assuré que la direction du soleil coïncide avec celle de la Qibla.

6.3.4.3 Les heures des prières carroniques dans l'occident chrétien

Au moyen-âge et à la Renaissance, on célébrait dans les monastères les offices aux heures dites **canoniques** qui sont :

- la prime, à la première heure inégale après le lever du soleil,
- la tierce, à la troisième heure inégale après le lever du soleil,
- la sixte, à la sixième heure inégale après le lever du soleil, c'est-à-dire à midi solaire,
- la none, à la neuvième heure inégale après le lever du soleil,
- les vêpres, à la douzième heure inégale après le lever du soleil, c'est-à-dire à son coucher.

Le moine préposé à l'astrolabe procédait de la manière suivante, par exemple pour la tierce. Il amenait le point antisolaire correspondant à la date d'observation sur la ligne d'heures inégales III, par rotation de l'araignée. Le point solaire se trouvait alors sur un almucantarat de hauteur h ; il plaçait le biseau de l'alidade, de manière à ce qu'il marque sur le limbe du dos de l'astrolabe la hauteur h en question ; ensuite il attendait que les rayons du soleil montant (nous sommes le matin) traversent les œilletons des deux pinnules ; à cet instant il sonnait l'heure de la tierce.

6.3.5 La détermination de la fin du crépuscule

Nous savons que l'astrolabe *d'Abù-Bakr* de Toulouse comporte, sur tous ses tympans, la ligne crépusculaire de hauteur -18° ; lorsque le soleil atteint cette hauteur a lieu la fin du crépuscule.

Raisonnons sur un cas particulier, celui du solstice d'hiver, qui ne nécessite pas l'utilisation de l'araignée. Au solstice d'hiver le soleil décrit le tropique du Capricorne dans le mouvement diurne.

Prenons sur le tympan de Marrakech (fig 4b) l'intersection du tropique du capricorne avec la ligne crépusculaire ; ce point se situe soit à lh1/3 heure inégale de nuit, soit à 6h26m, heure égale. Or le coucher du soleil se produit en m_D à 5 heures égales de l'après midi. La fin du crépuscule se situe donc au solstice d'hiver à 6h26m - 5h = 1h26m après le coucher du soleil. Le muezzin observait celui-ci depuis son minaret et au moment où le centre du soleil passait à l'horizon (1) il déclanchait un sablier ou une horloge à eau. Lorsque 1h26m s'était écoulée il annonçait la fin du crépuscule, où toute activité humaine cessait, en raison notamment des difficultés que l'on avait à s'éclairer.

6.3.6 Les usages astrologiques de l'astrolabe

Détermination de l'ascendant.

On appelle **ascendant** le degré de l'écliptique qui se lève à l'horizon lors de la naissance d'un individu. Pour déterminer celui-ci on utilise le tympan astronomique correspondant à la latitude du lieu. Par rotation de l'araignée, on amène le point solaire ou le point antisolaire, selon que la naissance a lieu la nuit ou le jour, sur la ligne des heures inégales, correspondant à l'instant de la naissance et l'on note le degré de l'écliptique situé sur le cercle horizon, côté Est.

Autres déterminations :

On détermine de même le centre du couchant, le medium cœliu et l'imum cœli.

Le centre du couchant est le degré de l'écliptique qui se couche à l'horizon au moment de la naissance d'un individu, le medium cœli est le point de l'écliptique qui culmine au même moment, l'imum cœli est le point qui passe au même instant au méridien inférieur.

Détermination de l'horoscope :

Pour déterminer l'horoscope il faut substituer au tympan astronomique le tympan astrologique de même latitude. Par rotation de l'araignée on amène l'ascendant sur le cercle horizon côté Est. Comme le tympan comporte les limites des maisons on visualise le tracé de l'écliptique parmi les maisons et les décans et l'on peut déterminer les positions : du point solaire, des signes du zodiaque, des étoiles de l'araignée et des constellations, auxquelles elles appartiennent. On peut trouver aussi les positions de la lune et des cinq planètes connues à l'époque, à condition de disposer d'éphémérides, donnent pour le jour et l'instant considéré le degré de l'écliptique qu'occupent ces astres. On tire de cela et des tables astrologiques du fond de la mère l'horoscope de l'individu.

6.3.7 L'astrolabe en navigation

Contrairement à une idée faussement répandue, l'astrolabe planisphérique que nous venons de décrire n'a jamais été utilisé en navigation pour une raison simple ; son utilisation nécessite la connaissance de la latitude du lieu où l'on se trouve ; or la latitude est justement l'un des paramètres qu'il faut déterminer en navigation.

On a tendance à confondre l'astrolabe planisphérique et l'astrolabe nautique, constitué d'une lourde couronne circulaire graduée, munie d'une alidade, qui l'on tenait à la main au moyen d'un anneau prévu à cet effet. Mais en raison des mouvements du navire l'utilisation de cet astrolabe, de même que celle d'autres instruments permettant la mesure des hauteurs des astres était quasi impossible en mer avant l'invention du sextant. Lors de l'exploration des côtes d'Afrique à la fin du 15e siècle, les marins portugais effectuaient à terre les observations de latitude prescrites par le roi du Portugal Jean II.

6.3.8 L'astrolabe instrument pédagogique dans le cadre du quadrivium

Dans l'occident chrétien les études dans les Universités comportaient au moyen-âge et à la Renaissance l'enseignement du trivium et du quadrivium ; celui-ci était composé de quatre disciplines : l'arithmétique, la géométrie, la musique et l'astronomie. Comme nous avons pu le constater notamment en 2.2.1.2 et en 6.3.3 l'astrolabe présente un intérêt pédagogique certain ; nous savons aussi qu'il permet la résolution de douze problèmes astronomiques liés au triangle de position, énumérés en 6.2. Pour ces raisons l'astrolabe a été très utilisé pour l'enseignement de l'astronomie dans le cadre du quadrivium.

(1) Au n° 6.33 et dans ce paragraphe traitant de couchers du Soleil on néglige la réfraction.

7 Bref historique de l'astrolabe

L'astrolabe (du grec "preneur d'astres") est essentiellement un instrument scientifique dont la conception résulte de l'interférence de deux sciences majeures, dans lesquelles ont excellé les Grecs : l'astronomie et la géométrie. Le principe de l'astrolabe repose sur l'utilisation de la projection stéréographique que l'on doit vraisemblablement à *Apollonius de Perge*, l'auteur des Coniques qui vivait à la fin du IIIe siècle avant J.-C. ; la première utilisation du principe de l'astrolabe pourrait remonter à *Hipparque*, le plus grand astronome de l'Antiquité, qui observait vers 150 avant J.-C.

Tout astrolabe est à la fois une œuvre d'art et un instrument astronomique, l'un des plus performants qu'ait conçu le génie humain pour scruter le ciel et résoudre tous les problèmes astronomiques liés au triangle de position.

L'astrolabe dans l'Antiquité

Vers 150 après J.-C., *Ptolémée* cite dans la Tétrabible, sous le nom "d'instrument horoscopique", un instrument très voisin de l'astrolabe. Mais la première description de l'astrolabe, permettant de résoudre 11 problèmes dont certains d'astrologie, est celle de *Jean Philopon*, qui vécut à Alexandrie vers 550 après J.-C. Vers 650, l'évêque syriaque *Sévère Sebokht* décrit l'instrument et son mode d'emploi en résolvant 25 problèmes. Tous les ouvrages arabes qui suivront se référeront au traité fondamental de *Sebokht*.

L'astrolabe dans le monde arabe

Alors que l'astrolabe de Philopon ne comportait que les cercles de hauteur égales (nommés par les Arabes **almucantarats**, terme que nous avons conservé en Occident), les Arabes ajoutent les **cercles d'égal azimut**, qui leur permettent de s'orienter de jour et de nuit dans les déserts. L'astrolabe le plus ancien, conservé jusqu'à nos jours, a été construit en 927-928 ; il est présenté au Musée national du Koweit.

En 647, les Arabes avaient pénétré en Afrique du Nord et en 710 en Espagne, développant dès le VIIIe siècle un important foyer culturel à Cordoue, animé à la fin du Xe siècle par l'astronome *Maslama* de Madrid ; on lui doit des tables de médiation - déclinaison d'étoiles, qui corrigées de l'effet de précéssion des équinoxes (1) ont servi à *Abù-Bakr* à positionner les étoiles de l'araignée de son astrolabe.

Au XIe siècle, *Arzachiel* de Tolède invente la **saphaea**, astrolabe universel, dont le principe sera repris cinq siècles plus tard dans **l'astrolabe catholique** de *Gemma Frisius*. Aux XIIe et XIIIe siècles, le Maroc avec sa capitale Marrakech (que l'on désigne par "Maroc") et avec Fez, devient un foyer important d'études astronomiques et de réalisation d'astrolabes. C'est en 1216-1217 *qu'Abù-Bakr* construit à Marrakech l'astrolabe du Musée Paul Dupuy ; on continuera à réaliser des astrolabes au Maroc jusqu'au XVIIIe siècle.

L'astrolabe d'Abù-Bakr, est de type **hispano-mauresque** ; il a été détenu par le couvent des Frères prêcheurs de Toulouse (devenus par la suite les Jacobins), par l'astronome *Jean Vidal* de Mirepoix, directeur de l'observatoire de Toulouse de 1800 à 1807. Il fut cédé en 1893 au Musée Saint-Raymond de Toulouse, puis transféré en 1949 au Musée Paul Dupuy.

L'introduction de l'astrolabe en Occident

La Catalogne et notamment l'abbaye de Ripoll ont joué un rôle important dans l'introduction de l'astrolabe en occident.

Le premier traité d'astrolabe latin qui figure dans le manuscrit 225 du Fonds de Ripoll (bibl. de Barcelone) serait d'un certain *Lupitus,* avec lequel fut en relation *Gerbert d'Aurillac* ; celui-ci, qui séjourna en Catalogne, devint Pape en 999 sous le nom de *Sylvestre II* et contribua beaucoup à la diffusion de l'astrolabe en occident.

Du 10e siècle daterait l'astrolabe carolingien de la collection *Marcel Destombes*, actuellement exposée au Musée de l'Institut du Monde arabe à Paris ; cet astrolabe pourrait être le plus ancien astrolabe latin.

Les historiens de l'astrolabe utilisent fréquemment le terme d'école **hispano-mauresque** pour désigner une école d'astrolabistes ayant opéré en Espagne et au Maroc. Ces astrolabistes ont puisé aux mêmes sources antiques qui sont essentiellement : l'Almageste, la Tetrabible, le Planisphère, ouvrages de *Ptolémée* qui vivait à Alexandrie au 2e siècle de notre ère. Il en résulte que les astrolabes hispano-mauresques, tels que celui *d'Abù-Bakr* ont des points communs avec les astrolabes gothiques. Sur l'astrolabe *d'Abù-Bakr* du Musée de l'observatoire de Strasbourg, antérieur de huit ans à celui de Toulouse, l'inscription des mois et des signes du zodiaque du calendrier zodiacal est en caractères gothiques, ce qui peut paraître surprenant pour un astrolabe réalisé à Marrakech. Comme dans l'occident latin les astrolabistes arabes utilisent le calendrier julien, car le calendrier musulman, lunaire, est totalement inadéquat.

Mais inversement les apports de l'astronomie islamique médiévale sont évidents dans le vocabulaire occidental : nadir, zénith, almucantarat sont des mots arabes ; les araignées des astrolabes gothiques portent aussi des noms d'étoiles arabes, par exemple : Altaïr, Déneb, Véga, étoiles du triangle d'été, Aldébaran (la suivante), Algol de al-gul (la goule), Rasalhague, etc..., ces noms d'étoiles ayant subsisté jusqu'à nos jours.

Diffusion de l'astrolabe dans le Monde chrétien au Moyen âge et à la Renaissance.

Au 11e siècle se développent en Lotharingie des foyers d'études astronomiques, où l'on utilise l'astrolabe, tels que ceux des écoles cathédrales de Cologne, de Liège, de l'Ecole de St-Gall (Suisse actuelle). Un moine de Reichenau, abbaye bénédictine d'une île du Lac de Constance, connu sous le nom *d'Hermann le Boiteux* (1013-1054) est considéré comme l'un des précurseurs de la transmission de la science arabe en occident et de l'instroduction de l'astrolabe ; il est l'auteur de deux ouvrages : "De mensura astrolabii" et "de utilitatibus astrolabii".

(1) Précession des équinoxes : Mouvement qui affecte le déplacement sur l'écliptique du point vernal γ et des signes du zodiaque par rapport à la sphère des fixes ; le déplacement est de 1° tous les 70 ans ; donc les tables d'étoiles utilisées par les astrolabistes ne sont valables que pour une période déterminée.

Au 12e siècle paraissent plusieurs traités sur l'astrolabe, de *Raymond de Marseille*, de *Rodolphe de Bruges*, de *Jean de Séville*, etc... l'astrolabe apparait sur les vitraux des cathédrales comme symbole de l'astronomie. Le fils *d'Abélard* et *d'Héloïse* est appelé *Astrolabe.*

En 1143 *Hermann le Dalmate* (ou de Carinthie) achève à Tolosa la traduction du Planisphère de *Ptolémée* qui traite de la projection stéréographique. L'ouvrage de Ptolémée avait été traduit du grec en arabe par *Maslama*, déjà cité et c'est cette traduction arabe qui elle-même est traduite en latin par *Hermann le Dalmate* ; elle fera faire de sensibles progrès à la compréhension des propriétés de la projection stéréographique et à la construction des astrolabes.

A la fin du 13e siècle *Profatius* découvre le quadrans novus, réduction de l'astrolabe à l'un de ses quarts, ce qui donne l'astrolabe-quadrant.

Au début du 15e siècle *Jean Fusoris* écrit le premier traité sur l'astrolabe en langue française et réalise à Mezières-sur-Meuse un certain nombre d'astrolabes, notamment pour le Pape et le Roi d'Aragon.

Au 16e siècle Nuremberg et la région de Louvain-Anvers deviennent des foyers actifs d'études astronomiques et de réalisations d'astrolabes.

A Louvain en 1550 *Gemma Frisius* reprend le principe de la Saphaea *d'Arzachiel* et décrit dans le "De astrolabico liber" un astrolabe universel, valable pour toutes les latitudes qu'il appelle **l'astrolabe catholique** ; il utilise encore les propriétés de la projection stéréographique, mais non plus de la projection stéréographique polaire.

Le Musée Paul Dupuy possède dans ses collections un astrolabe sur quart de cercle, unique en son genre, réalisé à Anvers en 1579 par *Adrien Descrolières*, dont l'une des faces est justement un astrolabe catholique, celle-ci étant malheureusement cachée aux visiteurs, car posée contre le fond de la vitrine. L'autre face de ce quart de cercle comporte : une **table des horizons**, astrolabe universel pour les latitudes de 1 à 90°, mais avec lequel on ne peut résoudre que des problèmes liés aux levers et aux couchers des astres,

• une araignée avec calendrier grégorien, bien qu'au recto figure la date 1579 de réalisation de l'astrolabe

• un **abaque de transformation des heures égales** en heures inégales. La présence de cet abaque montre qu'en cette fin du 16e siècle on continuait à utiliser les heures inégales.

Un des plus célèbres astrolabistes de Louvain fut *Gualterus Arsenius*, qui réalisa de remarquables astrolabes, gravés souvent sur les deux faces d'un astrolabe catholique et d'un astrolabe classique à araignée.

Le 16e siècle voit aussi la vogue des **horloges astrolabiques de table**, telle que celle *d'Isaac Habrecht*, construite à Strasbourg en 1578, l'une des pièces les plus remarquables de la collection d'horlogerie de la donation *Edouard et Gaston Gélis* à la ville de Toulouse.

Dans une horloge astrolabique le mouvement d'horlogerie entraîne sur la face arrière de l'horloge la rotation de l'araignée par rapport à un tympan établi pour la latitude du lieu, soit $\varphi = 48°$, latitude de Strasbourg.

Si l'horloge *d'Habrecht* est d'une réalisation remarquable au point de vue horlogerie et artistique, le constructeur n'avait cependant pas le savoir-faire d'un astrolabiste ; j'ai noté en effet plusieurs fautes ou erreurs : erreurs de dénomination d'étoiles, faute d'un demi degré dans l'obliquité de l'écliptique, faute dans la position de la ligne crépusculaire ; mauvaise numérotation des maisons du ciel.

Aux 16e et 17e siècles les horloges qu'elles soient astrolabiques ou non pouvaient avancer ou retarder par jour d'un quart et d'heure et même davantage. Aussi pour régler ces horloges on utilisait soit un cadran solaire, soit un astrolabe avec son alidade pour viser le soleil ou des étoiles ; si on admet une précision de l'ordre du degré obtenue à l'astrolabe, cela correspond en temps à quatre minutes.

Les progrès réalisés dans les constructions des horloges ont été l'une des causes du déclin de l'astrolabe au 18e siècle dans le monde occidental.

Comme les astrolabes présentent tous de réelles qualités artistiques, ils font l'objet depuis la fin du 18e siècle d'un commerce d'art pratiqué par des antiquaires spécialisés. Mais des astrolabes bien imités d'après des modèles anciens, donc non authentiques, sont souvent mis en circulation dans les circuits commerciaux. Des spécialistes arrivent à déceler les falsifications en s'aidant notamment de l'analyse des métaux utilisés. En général les astrolabes anciens authentiques sont vendus à des prix très élevés pouvant atteindre ou dépasser le million de nouveaux francs.

7 Conclusion

L'astrolabe est donc à la fois un instrument scientifique, mais aussi un objet d'art, cette fonction ayant tendance à occulter la première. Si on admet que l'astrolabe a été utilisé pour la première fois par Hipparque vers 150 avant J.-C. et qu'on en fabriquait encore en Occident vers 1750, cela donne à cet instrument, l'un des plus ingénieux et les plus performants qu'ait conçu l'esprit humain, une longévité tout à fait remarquable de 1900 ans environ, soit près de deux millénaires.

Bibliographie sommaire

1 Michel (Henri), *Traité de l'astrolabe, 2 éditions, Paris, 1947 - 1976 épuisées. L'ouvrage peut être consulté en bibliothèque.*

2 Saunders (Harold), *All the astrolabes, Oxford, 1984.*

3 National Maritime Museum Greenwich, *"The planispheric astrolabe" ; plusieurs éditions.*

4 Webster (Roderick S.), *The astrolabe. Some notes on its history, construction and use. Lake Bluff, éd. 1974.*

Les ouvrages 3 et 4 sont accompagnés d'un carton prédécoupé permettant au lecteur de construire lui-même un astrolabe en carton, mais pour une latitude en général différente de celle du lieu de résidence.

5 d'Hollander (Raymond), *L'astrolabe. Les astrolabes du Musée Paul Dupuy de Toulouse, 1993.*