Compte tenu de l'intérêt suscité parmi les lecteurs de XYZ par la série d'articles de M. J.-J. Levallois intitulés : "Trois cents ans de géodésie française", le Comité de Rédaction de la revue a estimé qu'il convenait de conserver une rubrique historique des sciences géographiques.

C'est pourquoi XYZ commence par vous présenter une première série d'articles consacrés aux sciences géographiques, à la connaissance du monde et à la conception de l'univers dans l'Antiquité par Raymond d'Hollander.

Note du Comité de Rédaction d'XYZ

Sciences géographiques, connaissance du monde et conception de l'univers dans l'Antiquité

par Raymond d'HOLLANDER, ingénieur général géographe

INTRODUCTION

Les sciences géographiques de l'Antiquité ont eu principalement pour but :

— de comprendre l'univers

— de connaître et aussi de cartographier le monde connu ou "œcumène" ; celui-ci a pour centre la Grèce et se réduit d'abord essentiellement à la Méditerranée, à la Mer Noire et à leurs pourtours. Il s'étendra ensuite jusqu'à l'Inde, englobera le nord de l'Afrique jusqu'à une quinzaine de degrés au sud de l'équateur et l'Europe jusqu'au parallèle de Thulé (63° de latitude nord).

La compréhension de l'univers et la connaissance de l'œcumène n'ont pu se développer que grâce à l'astronomie, mais cette science n'a pu elle-même prospérer qu'avec les progrès des mathématiques et surtout de la géométrie. C'est donc à la période grecque à partir de 600 ans avant Jésus-Christ que se développent vraiment les sciences géographiques, qui se perfectionnèrent pendant la période romaine.

L'astronomie n'est pas la seule science géographique de l'Antiquité ; la connaissance de l'œcumène résultera d'explorations et de découvertes, maritimes ou terrestres, qui à l'époque grecque donneront lieu à des documents écrits. C'est ainsi que naîtra la géographie grecque, qui sera tantôt descriptive, tantôt explicative, tantôt mathématique et qui s'appuyera sur la cartographie, son auxiliaire indispensable. La géographie mathématique grecque peut être considérée comme l'ancêtre de la géodésie.

Nous n'avons pas la prétention ici de faire une étude exhaustive de l'astronomie et de la géographie grecques ; nous nous contenterons d'en évoquer les principales étapes et les hommes qui y ont joué un rôle déterminant.

Nous évoquerons aussi les techniques topographiques ; nous nous efforcerons de décrire les instruments astronomiques et topographiques et d'en indiquer le mode d'emploi.

Avant d'aborder la période grecque nous consacrerons le premier article aux sciences géographiques dans la haute antiquité.

1. SCIENCES GEOGRAPHIQUES DANS LA HAUTE ANTIQUITE

On sait que la période néolithique (pierre nouvelle ou pierre taillée) est celle où l'homme est passé de l'état nomade, vivant de la chasse à l'état de producteur : éleveur et agriculteur. On convient en général de situer le berceau naturel de la néolithisation dans le **"croissant fertile"**, qui s'étend du golfe persique à la Méditerranée. Deux importantes civilisations y prennent naissance au 4e millénaire avant Jésus-Christ : la civilisation égyptienne et la civilisation babylonienne. Vers la fin du néolithique, vers 3 300 ans avant J.-C., l'homme découvre l'écriture idéographique, qui par une longue évolution aboutira à l'écriture alphabétique, qui s'est constituée peu à peu dans la région Syro-palestinienne entre le 18e et 14e siècles avant J.-C. Vers la même période apparaissent la numérotation décimale d'abord, puis l'arithmétique, une géométrie sommaire, que développeront considérablement les Grecs ; apparaissent ensuite les sciences géographiques : l'astronomie pour régler le temps, la topographie pour organiser l'espace agraire, effectuer de grands travaux, construire de grands monuments.

1.1. L'astronomie égyptienne

Dans les temps les plus anciens les Egyptiens avaient un calendrier réglé sur le cours de la lune, puis ils définirent une année de 360 jours composée de 12 mois, chacun de 30 jours, de sorte qu'une correction s'imposait : il fallait ajouter 5 jours **"épagomènes"**. Cette année appelée **"vague"**, qui se déplaçait aussi par rapport aux saisons, resta l'année officielle de 4228 jusqu'à 238 avant J.-C et fut pratiquement employée jusqu'au 4e siècle de notre ère. En 238 avant J.-C. **Ptolémée III** ajouta un 6e jour épagomène tous les 4 ans, mais cette réforme ne devint pas d'usage courant.

Les astronomes égyptiens arrivèrent à déterminer le plan de l'équateur céleste et de part et d'autre de celui-ci ils distinguaient 36 **"décans"** qui devaient correspondre à des constellations et qui étaient utilisées pour connaître les mois et les heures de la nuit.

Dans leur vie courante les Egyptiens utilisaient la **"décade"** ou période de 10 jours ; ce sont les Assyro-Babyloniens qui créeront la semaine de 7 jours.

Les astronomes égyptiens savaient déterminer la position des points cardinaux, ce qui leur permettait notamment d'orienter leurs pyramides.

1.1.1. Les instruments utilisés par les astronomes égyptiens

1.1.1.1. Le "merkhet"

Le **"merkhet"**, instrument égyptien rudimentaire était destiné à observer le passage des étoiles dans le plan du méridien. Il consistait en une nervure de palme fendue à sa partie supérieure, tenue verticalement par un opérateur accroupi, face auquel un autre opérateur tenait un fil à plomb (Fig. 1).

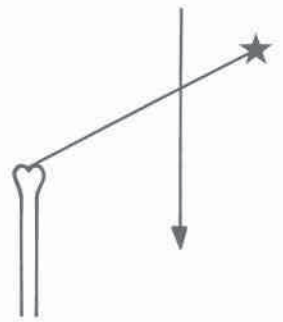


Fig. 1 - Le merkhet.

Le merkhet et le fil à plomb matérialisaient un plan de direction nord-sud. L'opérateur tenant le merkhet, notait d'après une horloge à eau ou **"clepsydre"** les instants où les étoiles passaient derrière le fil à plomb, ainsi que la hauteur évaluée d'après la partie du corps de l'opérateur tenant le fil à plomb.

1.1.1.2. La "règle égyptienne"

La règle comprend deux parties rectangulaires ; l'une d'entre elles est rendue verticale au moyen d'un fil à plomb qui est placé dans une encoche latérale. La partie horizontale est dirigée vers le soleil. L'ombre portée par le bord supérieur de la partie verticale indique par sa longueur l'heure de la journée sur une graduation préalablement établie pour une période de l'année en s'aidant de la clepsydre. Il est donc nécessaire de prévoir plusieurs graduations pour avoir l'heure toute l'année (Fig. 2).

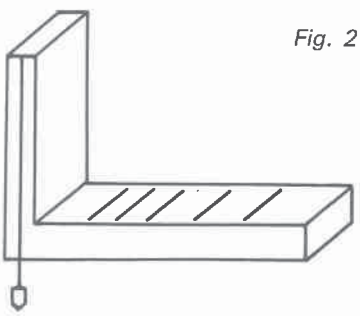


Fig. 2 - La règle égyptienne.

La **règle égyptienne** présente une variante dans laquelle la partie horizontale est remplacée par une partie inclinée, ce qui évite des ombres trop allongées en début ou en fin de journée.

1.1.1.3. "La "clepsydre"

La **"clepsydre"** est une horloge à eau dans laquelle l'eau s'écoule d'un vase dans un second placé en dessous. L'écoulement du temps est mesuré par la durée de l'écoulement de l'eau, durée proportionnelle à la hauteur atteinte par l'eau dans le vase inférieur. On trace sur la face interne de celui-ci une graduation, dont la lecture correspondant au niveau atteint par l'eau indique le temps écoulé depuis le début du remplissage du vase.

1.2. L'astronomie assyro-babylonienne

Il y a environ 6 000 ans des prêtres babyloniens se tenaient sur de hautes tours qui s'élevaient près des temples, épiant les astres, notant les horaires de leurs mouvements, de manière à établir des calendriers qui réglaient toute l'activité des hommes, de l'agriculture aux cérémonies religieuses. L'astronomie babylonienne visait aussi à effectuer des prévisions astrologiques, liées à des conceptions religieuses ; les astrologues tenaient des réunions dans lesquelles ils interprétaient leurs observations et en communiquaient les résultats aux rois et à certains personnages importants. Mais, contrairement à ce qui s'est passé dans la Grèce antique, l'astronomie babylonienne n'eut jamais l'ambition de comprendre la constitution de l'univers.

On peut distinguer dans l'astronomie babylonienne deux parties distinctes.

— La première allant jusqu'à l'ère que **Ptolémée** (1) désigne sous le nom **"d'ère de Nabonassar"** (747 avant J.-C.). Cette période qui correspond à peu près à l'histoire de l'astronomie égyptienne toute entière (plus courte d'environ un millénaire) que l'astronomie babylonienne, a vu l'établissement du calendrier babylonien, d'abord lunaire avec des mois alternativement de 29 et 30 jours, puis lunisolaire de 29,5 × 12 = 354 jours, année comptant 11 jours de moins que l'année julienne. Il était nécessaire de doubler un mois tous les trois ans environ, mais cela se faisait sans règle fixe, sur ordre du roi.

— La deuxième commençant à – 747, date à laquelle **Ptolémée** jugea que l'on pouvait utiliser les données astronomiques des Babyloniens, grâce notamment à des règles plus précises pour l'établissement du calendrier. C'est au cours de cette période que les Babyloniens arrivèrent à définir **l'écliptique**, grâce notamment à l'utilisation du **"polos"** (nom babylonien), connu en Grèce sous le nom de **"scaphé"** et que nous décrirons plus loin. Ayant observé que les trajectoires de la lune et des planètes restaient dans une bande annulaire d'environ 16° encadrant l'écliptique, ils divisèrent cette bande que les Grecs appeleront **"zodiaque"** en douze **"signes"** d'égale ampleur. Chaque signe du zodiaque fut divisé ensuite en 3 parties égales ou **"décans"**, ce qui revenait à diviser le zodiaque en 36 **décans** de 10°, décomptés le long de l'écliptique, contrairement à ceux des Egyptiens qui se développaient le long de l'équateur. Chaque **décan**

(1) *Claude Ptolémée, astronome alexandrin, 90-168 après J.-C.*

est caractérisé par une étoile ou une constellation qui en marque le commencement.

Les Babyloniens avaient observé qu'une étoile visible dans la région de l'horizon où le soleil va se lever, cessait d'être visible parce qu'elle était occultée par les rayons du soleil, puis les jours suivants elle était vue à nouveau quelques instants avant le lever du soleil et on la voyait de mieux en mieux se lever de plus en plus tôt. On a donné par la suite le nom de "lever héliaque" (2) à un tel lever d'étoile s'effectuant peu avant l'instant du lever du soleil ; après s'être éloignée de plus en plus du soleil, l'étoile repassait un an après dans la même zone de l'horizon avant le lever du soleil, cessait d'être visible, était vue à nouveau, puis s'éloignait jour après jour du soleil.

Les astronomes babyloniens en déduisaient qu'à deux disparitions ou réapparitions successives, l'étoile devrait être à la même distance du soleil et que l'intervalle entre ces deux disparitions ou réapparitions était le temps que met le soleil à faire le tour de l'écliptique. Ils reconnurent que l'année n'était ni de 354 jours, ni de 360 jours, mais de plus de 360 jours.

En admettant que sur chacune des observations ils aient pu se tromper d'un jour ils en concluaient que l'année faisait 363 ou 367 jours. Mais en répétant la même observation pendant 100 ans et en comparant la première à la dernière, l'erreur n'était plus que de 2/100 de jour. L'année de 365 jours 1/4, qui est celle du calendrier julien, put être ainsi déterminée — assez tardivement il est vrai — aussi bien chez les Egyptiens que chez les Chaldéens.

Au début les astronomes babyloniens se contentèrent d'observer les trajectoires des planètes ou "lumières mobiles du ciel" en longitude écliptique seulement en identifiant le décan où se trouve la planète. Par la suite ils améliorèrent leurs observations en mesurant les écarts angulaires en longitude et latitude écliptique entre la planète ou la lune et l'étoile connue la plus proche. Ils établirent des tableaux détaillés donnant les positions des astres mobiles : ils observèrent des séries à variations linéaires, mais en dents de scie ; ils en dégagèrent des périodicités, qui leur permirent par extrapolation de fixer la position future des astres mobiles, d'où des éphémérides contenant le début des saisons, les levers et couchers **héliaques** des principales étoiles, les dates des phases de la lune. Vers − 380 **Kidinnu,** le plus célèbre astronome babylonien, réussit à établir les éphémérides de la lune, indiquant avec précision les dates de ses éclipses pour un siècle. Par contre les astronomes babyloniens n'ont pas obtenu de résultats valables dans la prévision des éclipses du soleil.

Pour pouvoir déterminer les longitudes écliptiques des astres il était nécessaire de définir sur l'écliptique un point origine : ce point est l'un des points situés à l'intersection de l'écliptique et de l'équateur céleste, que l'on appelle les **points équinoxiaux** γ et γ'. Le premier γ est le point équinoxial de printemps, le second γ' est le point équinoxial d'automne. Lorsque le soleil passe en chacun de ces points il a une déclinaison nulle.

Voici comment, d'après **Lalande** (Bibl 1), les Babyloniens sont parvenus à déterminer sur la sphère céleste la position des points équinoxiaux.

Lors de la culmination du soleil S le 21 mars, jour de l'équinoxe de printemps, celui-ci a une ascension droite très voisine de zéro ainsi qu'une déclinaison elle aussi très voisine de zéro : il est donc très proche du point γ, de sorte que les Babyloniens confondaient ce point avec la culmination S du soleil, le jour de l'équinoxe de printemps. Supposons l'obseration faite à Babylone dont la latitude est $\varphi = 32°,5$.

Si on vise le soleil à sa culmination, il aura une distance zénithale $z = 32°,5$. Douze heures après c'est-à-dire à minuit, visons dans le ciel une étoile dont la distance zénithale est aussi $z = 32°,5$.

Le point γ qui coïncidait avec la position du soleil a tourné de 180° et est venu occuper la position γ de la fig. 3, de sorte que le point visé dans le ciel à minuit n'est autre que γ' d'ascension droite 180°. De manière analogue on pourra déterminer dans le ciel la position du point γ en observant le soleil à sa culmination lors de l'équinoxe d'automne.

A partir des points équinoxiaux on détermine aisément les **points solsticiaux** : σ point solsticial d'été, σ' point solsticial d'hiver. Le point σ s'obtient en prenant le milieu i de $\gamma\gamma'$ et en portant le long du cercle horaire de i l'arc $i\sigma = \epsilon = 23°,5$, égal à l'obliquité de l'écliptique. La figure 3 représente l'équateur et l'écliptique dans une position peu habituelle : il suffit de faire effectuer à l'ensemble de la figure une rotation de 90° autour de l'axe du monde PP' pour obtenir la figure 4, plus usuelle.

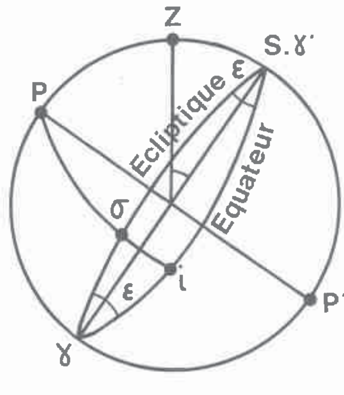


Fig. 3

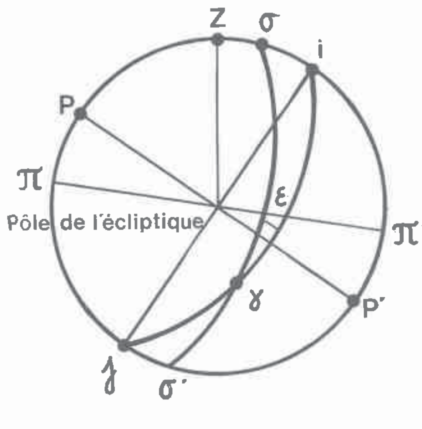


Fig. 4

(2) *On a une définition analogue pour le "coucher héliaque" d'une étoile.*

La détermination de l'obliquité de l'écliptique : ϵ peut être faite au **gnomon** ou au **scaphé** que nous décrirons plus loin, mais toujours d'après **Lalande**, voici comment auraient procédé les astronomes babyloniens.

Considérons une pièce parallélépipédique allongée dans le sens du méridien avec une petite ouverture B dirigée vers le Midi (Fig. 5).

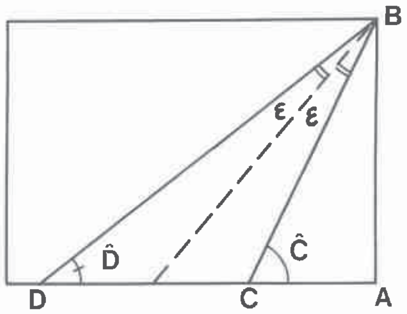


Fig. 5

Lors de la culmination du soleil au solstice d'été on mesure sur le sol la longueur de l'ombre : AC ; lors de la culmination du soleil au solstice d'hiver on mesure la longueur de l'ombre : AD.

On calcule aisément l'angle $\hat{C}$, tel que :

$$\tan \hat{C} = \frac{AB}{AC}$$

et l'angle $\hat{D}$, tel que : $\tan \hat{D} = \dfrac{AB}{AD}$

On en déduit : $2\,\epsilon = \hat{C} - \hat{D}$, d'où l'obliquité de l'écliptique : ϵ.

Lalande (Bibl. 1) indique que les Babyloniens étaient parvenus à connaître approximativement la grandeur de la terre. La marche du soleil serait à peu près celle d'un homme parcourant une lieue par heure. S'il marche constamment sur un grand cercle autour de la terre, la distance parcourue en 365 jours serait :

$$24 \times 365 = 8\,760 \text{ lieues}$$

Comme une lieue correspond à un vingt-cinquième de degré terrestre, cela donne :

$$\frac{111{,}11}{25} \times 8\,760 = 38\,933 \text{ km}$$

Mais Lalande ajoute : "Cette connaissance ne semble pas remonter plus haut que 300 ans avant notre ère". Dans ces conditions, on peut penser que les Chaldéens ont eu connaissance de la mesure de la circonférence terrestre par Eratosthène, que nous étudierons ultérieurement, et que pour bien apprécier sa grandeur ils ont utilisé l'image d'un homme la parcourant à pied durant une année entière.

1.2.1. Les instruments utilisés par les astronomes babyloniens

1.2.1.1. Le gnomon

Le "**gnomon**" est constitué par une tige verticale AB plantée sur une surface horizontale, dont on observe la direction et la longueur de l'ombre. Imaginé par les Egyptiens sous la forme de l'**obélisque**, le **gnomon** fut perfectionné par les Babyloniens, qui l'utilisaient pour connaître l'heure par la direction de l'ombre et la date par la longueur de l'ombre. Voici le principe d'utilisation du **gnomon**.

Pour que les observations faites au gnomon soient assez précises, il importe que les dimensions de l'instrument soient assez grandes ; aussi la hauteur du gnomon dépasse-t-elle souvent 30 m. Comme le diamètre apparent du soleil est de 32', on a une ombre assez nette du bord supérieur du soleil en b, mais une pénombre bb', dont l'extrémité b', correspondant au bord inférieur du soleil, n'a aucune netteté. Cet inconvénient fut d'abord évité en surmontant le gnomon d'une boule ; alors la pénombre est symétrique autour du point b, mieux déterminé, celui-ci correspondant au centre de la boule et au centre du soleil (Fig. 6).

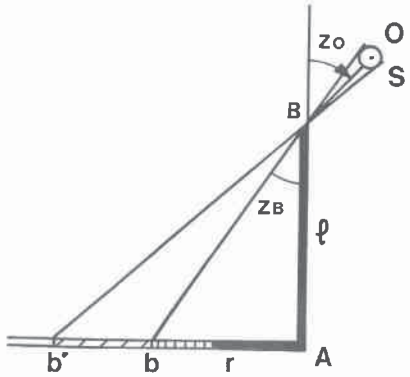


Fig. 6

Ce perfectionnement semble aussi avoir été apporté par les Grecs. Plus tard les Arabes remplacèrent la boule par un trou circulaire ; le centre de l'ombre recevait plus de lumière que les régions environnantes et il correspondait au centre du trou et au centre du soleil.

La longueur de l'ombre s'appelle le "**retrait**" : r = Ab ; la distance zénithale du bord supérieur du soleil est alors donné par $\tan z_b = \frac{r}{l}$, l étant la hauteur du gnomon. Quant à la distance zénithale du centre du soleil, elle est : $z_o = z_B + 16'$. Cette correction du demi-diamètre apparent du soleil n'est pas nécessaire si on utilise un gnomon à boule ou à trou. Si on néglige la variation de la déclinaison du soleil au cours d'une journée, on peut admettre que celui-ci décrit dans le mouvement diurne un parallèle céleste : le rayon lumineux joignant B au centre du soleil décrit une portion de cône de révolution, dont la section par le plan de l'horizon est une portion d'hyperbole assez aplatie, qui correspond au lieu géométrique de l'extrémité de l'ombre b (Fig. 7).

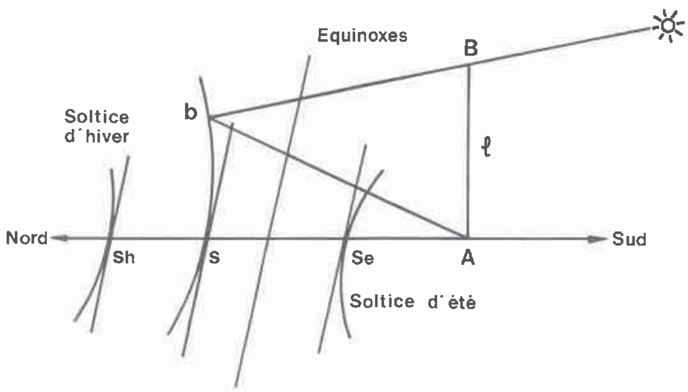


Fig. 7

Cette hyperbole a son sommet s sur le méridien passant par A, s correspondant à l'instant de la journée où l'ombre a une longeur minimale. Cet instant est le midi vrai où le soleil culmine au méridien. Au cours de l'année l'hyperbole d'ombre se déplace entre deux positions extrêmes correspondant aux solstices. On sait que lors de la culmination du soleil au solstice d'hiver la distance zénithale du soleil est $z_h = \varphi + 23°,5$, φ étant la latitude du lieu et 23°,5 l'obliquité de l'écliptique. Le sommet de l'hyperbole du solstice d'hiver est donc le point s_h tel que : $As_h = l.\tan(\varphi + 23°,5)$. De même le sommet de l'hyperbole du solstice d'été est le point s_e tel que : $As_e = l.\tan(\varphi - 23°,5)$.

Aux équinoxes le soleil décrit sur la sphère céleste un demi-cercle LSC, L étant le lever (exactement à l'est), S la culmination de distance zénithale : $z = \varphi$, (φ est la latitude du lieu), C étant le coucher du soleil exactement à l'ouest.

Sur la fig. 8 le centre de la sphère céleste est au point A, base du gnomon, de sorte que le cercle horizontal (HH') de la sphère céleste représente le sol horizontal de A. Dans ces conditions le rayon lumineux joignant le soleil (à l'infini) à B décrit un plan parallèle au plan du demi-cercle LSC, qui coupe le plan horizontal (HH') selon la droite L'C' parallèle à LC, de direction est ouest. Cette droite, qui est le lieu géométrique de l'ombre décrit aux deux équinoxes coupe le méridien HAH' en un point O tel que : $AO = l.\tan\varphi$.

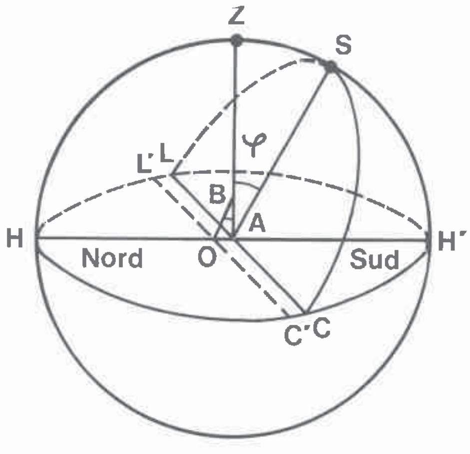


Fig. 8

Les Babyloniens graduaient les différentes courbes obtenues en deux sortes d'unités de temps : dans les premiers temps de leur astronomie ce furent les "heures inégales" ou "temporelles", plus tard ce furent les "heures égales".

Pour obtenir des "heures inégales" on mesurait à la clepsydre à différents moments de l'année l'intervalle séparant l'instant du lever du soleil de celui de son coucher ; cet intervalle divisé par 12 donnait la durée de "l'heure inégale" ou "heure temporelle" qui était variable selon l'époque de l'année ; elle va en croissant du solstice d'hiver au solstice d'été, puis en diminuant du solstice d'été au solstice d'hiver suivant.

Babylone étant à la latitude : $\varphi = 32°,5$, on calcule la durée H de la trajectoire semi-diurne du soleil par : $\cos H = -\tan\delta.\tan\varphi$ (1), où δ est la déclinaison du soleil. Pour le solstice d'été, prenons : $\delta = +24°$, d'où $H = 106°,48$, de sorte que la durée du jour théorique (sans réfraction) est : $2H = 212°,96 = 14\,h,197$. Ainsi la durée théorique du jour solsticial d'été était à Babylone : M' = 14 h 12 m.

Si on tient compte de la réfraction, on trouve : M'' = 14 h 18 m.

On en déduit la durée théorique du jour solsticial d'hiver : $\dfrac{360° - 212°,96}{15} = 9\,h,803 = 9\,h\,48\,m$

Si on tient compte de la réfraction, on trouve : 9 h 54 m.

Les durées théoriques différaient de celles du jour équinoxial de ± 2 h 12 m, de sorte que chaque heure inégale différait de l'heure équinoxiale (ou heure égale) au maximum de : $\pm \dfrac{2\,h\,12\,m}{12} \approx \pm 11\,m$.

On s'accommodait fort bien d'une telle variation de la durée de l'heure au cours de l'année, puisque les heures inégales ont été utilisées par les Grecs, les Arabes et même en Occident au Moyen Age. Nous aurons l'occasion d'y revenir à propos du "polos" (1.212), à propos du décompte du temps (1.22) et surtout quand nous étudierons l'astrolabe dans un des articles qui suivront celui-ci. Notons que l'amplitude de la variation de la durée de l'heure au cours de l'année est relativement faible à Babylone : 22 m environ, mais elle devient plus élevée au fur et à mesure qu'on s'élève en latitude. C'est ainsi qu'à la latitude $\varphi = 49°$, un peu au Nord de Paris, cette amplitude atteint environ 40 m.

Pour obtenir plus tard l'heure égale, les Babyloniens mesurèrent à la clepsydre l'intervalle de temps séparant deux culminations successives du soleil et ils divisèrent cet intervalle par 24.

Les Babyloniens marquaient empiriquement au sol la position de l'ombre du gnomon soit toutes les "heures inégales", soit toutes les "heures égales" à différentes époques de l'année, par exemple tous les mois à partir de l'équinoxe de printemps. En joignant les points homologues ils obtenaient dans le premier cas des courbes "d'heures inégales", dans le second cas des courbes d'heures égales.

1.2.1.2. Le polos ou scaphé

Le polos ou scaphé est une cuve hémisphérique, complète ou partielle, au fond de laquelle est fixée une tige verticale, qui comporte à sa partie supérieure une petite boule, située au centre I de la demi-sphère (Fig. 9).

L'ombre de la boule dessine sur la demi-sphère une courbe qui est la figure homothétique inverse de la trajectoire apparente du soleil, lors du mouvement diurne. On sait que cette trajectoire est une portion de parallèle de la sphère céleste.

Par suite de l'homothétie inverse il y aura inversion de toutes les directions ; dans la disposition

(1) Pour obtenir cette relation, il suffit de résoudre le triangle de position, en y introduisant la distance zénithale du soleil égale à 90° (triangle sphérique rectilatère).

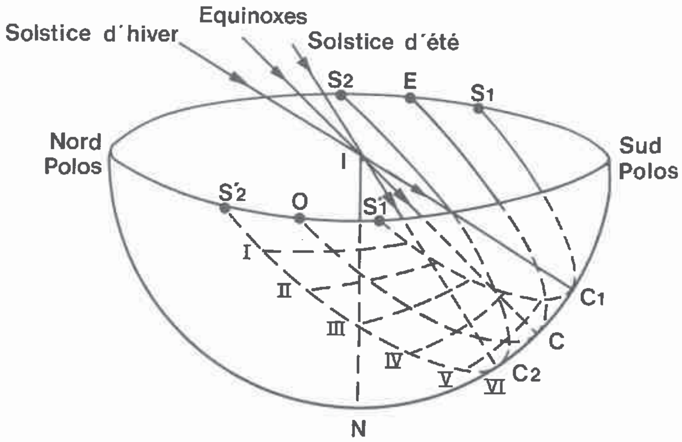


Fig. 9

de la fig. 9 le Nord vrai est à droite, mais celui du polos est à gauche ; l'Est vrai est dans la direction IO, l'Est du polos dans la direction IE.

Aux équinoxes l'ombre du soleil décrit le demi grand cercle ECO, qui représente l'équateur. E correspond au lever, exactement à l'Est, O correspond au coucher, exactement à l'Ouest ; C correspond à la culmination du soleil.

Au solstice d'été l'ombre du soleil décrit l'arc de cercle S_2 C_2 S'_2 d'amplitude supérieure à 180° : S_2 est le lever, S'_2 le coucher, C_2 la culmination. Cet arc de cercle matérialise le tropique du cancer.

Au solstice d'hiver l'ombre du soleil décrit l'arc de cercle S_1 C_1 S'_1, d'amplitude inférieure à 180° : S_1 est le lever, C_1 la culmination, S'_1 le coucher. Cet arc de cercle matérialise le tropique du capricorne.

Plaçons au point le plus bas du polos le nadir N, sur la verticale du centre I. Un arc de cercle tel que $\overset{\frown}{NC}$ représente la distance nadirale n = $\widehat{NIC}$, elle-même égale à la distance zénithale : z_c du soleil. Comme C correspond à la culminaion du soleil aux équinoxes, on a : $z_c = \widehat{NIC} = \varphi$, latitude du lieu qu'on peut ainsi mesurer sur le polos par l'amplitude de l'arc $\overset{\frown}{NC}$.

Les arcs $\overset{\frown}{CC_1}$ et $\overset{\frown}{CC_2}$ correspondent à l'obliquité de l'écliptique : $\epsilon = 23°,5$ ou $\epsilon = 24°$. La distance nadirale, mesurée selon l'arc de cercle $\overset{\frown}{NC_2}$, correspond à la distance zénithale du soleil lors de sa culmination au solstice d'été : $z_{c_2} = \varphi - \epsilon$.

La distance nadirale mesurée selon l'arc du cercle $\overset{\frown}{NC_1}$, correspond à la distance zénithale du soleil lors de sa culmination au solstice d'hiver : $z_{c_1} = \varphi + \epsilon$.

Les points E et O matérialisent sur le polos les points équinoxiaux γ et γ', le point C_2 correspondant au point solsticial d'été σ. L'écliptique est donc le grand cercle EOC_2 passant aussi par le point solsticial d'hiver σ', diamétralement opposé de C_1 par rapport à I, donc à l'extérieur du polos. Ainsi seule la moitié de l'écliptique est représentée sur le polos par le demi-grand cercle EC_2O, non dessiné sur la figure pour qu'elle reste suffisamment lisible.

Certains historiens de l'astronomie ont cru qu'en observant durant de longues années sur le scaphé l'ombre de la boule lors du lever du soleil à l'équinoxe de printemps les Babyloniens auraient pris conscience de la rétrogradation du point E ou point σ sur l'écliptique, donc de la **"précession des équinoxes"** (voir n° 1.2.2.3).

Les Chaldéens marquaient par un trait dans l'hémisphère la trajectoire de l'ombre aux solstices, aux équinoxes et peut-être à des dates intermédiaires.

Au début ils divisèrent chaque trajectoire semi-diurne :
$\overset{\frown}{S_2C}$, $\overset{\frown}{C_2S'_2}$ – $\overset{\frown}{EC}$, $\overset{\frown}{CO}$ – $\overset{\frown}{S_1C_1}$, $\overset{\frown}{C_1S'_1}$ en 6 intervalles égaux correspondant donc à des "heures inégales" au cours de l'année. A cette fin ils utilisaient la clepsydre comme pour le gnomon. Par les points homologues étaient tracées les courbes et heures inégales.

Plus tard, et pour les besoins de l'astronomie, ils divisèrent seulement les trajectoires semi-diurnes : $\overset{\frown}{EC}$ et $\overset{\frown}{CO}$ en 6 parties égales ; par les points obtenus ils tracèrent des arcs de grand cercle passant par le point P où l'axe du monde, perpendiculairement à l'équateur, perce le polos. Ils obtenaient ainsi des méridiens de la sphère céleste, également écartés, matérialisant des heures égales.

Vitruve dans son livre IX "de l'Architecture" (Bibl. 7) attribue l'invention de **"l'hémicyclium"**, creusé dans un cube, à **Bérose,** prêtre astronome chaldéen du 3e siècle avant J.-C. et l'invention du scaphé hémisphérique à **Aristarque de Samos,** ainsi d'ailleurs que celle du cadran circulaire plat ou **cadran équatorial,** que nous étudierons en 1.2.1.3.

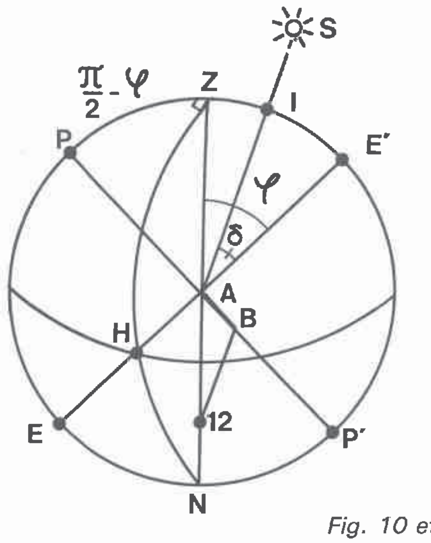
Les historiens de l'astronomie se sont interrogés sur la traduction de "hémicyclium". Il semble qu'il s'agisse d'une portion de la surface de l'hémisphère, car la totalité de la surface de celui-ci n'est pas nécessaire. On peut en effet neutraliser tout ce qui sur la fig. 9 est à gauche et plus bas que le tropique du cancer S_2 C_2 S'_2 et tout ce qui est à droite et plus haut que le tropique du capricorne S_1 C_1 S'_1. Dans les fouilles archéologiques on a trouvé bien plus souvent cette forme d'hémicylium, c'est-à-dire d'hémisphère amputé de la partie inutile, que des hémisphères complets.

1.2.1.3. Le cadran solaire

On doit aux Babyloniens l'invention du cadran solaire vertical non déclinant que l'on utilise encore de nos jours à titre accessoire et d'agrément.

Considérons une tige ou **"style"** AB fixé en A sur un mur et parallèle à l'axe du monde PP', le mur étant dirigé **exactement est-ouest.** Sur la sphère céleste de centre A la direction du mur est donc le vertical ZHN perpendiculaire au méridien PZN (fig. 10 et 11).

Considérons d'abord (fig. 10) l'instant où le soleil de déclinaison δ passe au méridien du lieu ; soit I sa culmination. Son angle horaire H est nul et il est midi vrai. Soit SA la direction des rayons lumineux venant du centre du soleil. Pour avoir l'ombre du style il suffit de considérer la parallèle à SA menée par B ; le plan qui contient cette direction et le "style" est le méridien lui-même qui coupe le vertical ZHN (le mur) selon la verticale ZN. Pour avoir



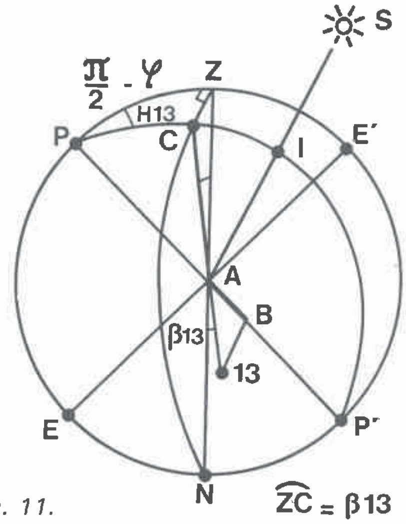


Fig. 10 et fig. 11.

l'extrémité de l'ombre de la tige il suffit donc de prendre l'intersection de la parallèle à SA menée par B avec la direction ZN, point que nous appelerons 12 pour indiquer qu'il est midi vrai.

Soit H l'angle horaire du soleil à un instant quelconque de la journée et à un moment de l'année où sa déclinaison est δ ; pour fixer les idées supposons qu'il soit 13 h (heure solaire). L'angle horaire du soleil est alors $H_{13} = 1 \text{ h} = 15°$. Le cercle horaire du soleil PIP' coupe le vertical ZHN selon la direction AC qui est la direction de l'ombre cherchée. Celle-ci fait avec la verticale l'angle β_{13} que l'on retrouve selon l'arc $\widehat{CZ}$ du triangle sphérique rectangle PZC. La résolution de celui-ci par la règle de Neper donne :

$\cos \varphi = \text{cotan } H_{13} \times \tan \beta_{13}$, d'où :

$\tan\beta_{13} = \tan H_{13} \times \cos \varphi$

$\tan\beta_{14} = \tan H_{14} \times \cos \varphi$

$\tan\beta_{15} = \tan H_{15} \times \cos \varphi$

etc...

Pour $\varphi = 32°,5$, $H13 = 15°$, $H14 = 30°$, $H15 = 45°$, on trouve respectivement :
$\beta_{13} = 12°,73$; $\beta_{14} = 25°,96$; $\beta_{15} = 40°,14$, etc...

Par raison la symétrie : $\beta_{11} = \beta_{13}$, $\beta_{10} = \beta_{14}$, $\beta_9 = \beta_{15}$ etc., d'où la construction du cadran solaire moderne de la fig. 12.

Bien entendu les astronomes babyloniens ne traitaient pas le problème par le calcul. Ils opéraient comme pour le gnomon en repérant le segment d'ombre toutes les heures par exemple et ceci à différentes époques de l'année, tous les mois par exemple.

L'extrémité de l'ombre décrit une droite horizontale lors des équinoxes ; aux autres périodes de l'année l'extrémité de l'ombre décrit des branches d'hyperbole, les deux hyperboles limites correspondant aux solstices.

Outre l'heure on pouvait donc aussi connaître approximativement la date par interpolation entre deux courbes mensuelles.

Si on utilise un tel cadran de nos jours il faut se rappeler qu'il donne l'heure solaire locale. Pour avoir l'heure légale il faut tenir compte de la différence de longitude du lieu avec le méridien origine du fuseau horaire concerné et de l'équation du temps : différence entre les angles horaires du soleil moyen et du soleil vrai, qui peut atteindre 15 minutes.

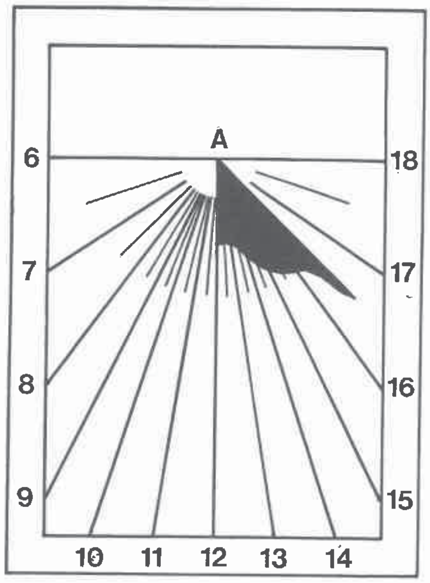


Fig. 12 - Cadran solaire moderne.

Cadran vertical déclinant. C'est une variante du cadran vertical tout court qui vient d'être décrit, où le mur est exactement est-ouest perpendiculaire à la direction du méridien. Dans le **"cadran vertical déclinant"** le mur est encore vertical, mais oblique par rapport à la direction est-ouest. La construction de ce type de cadran solaire appartient à ce que l'on appelle la "gnomonique" (Bibl. 4).

Cadran équatorial. C'est le cadran le plus simple à construire. Il se compose d'un disque circulaire métallique, divisé sur ses deux faces en heures, c'est-à-dire de 15 en 15°, et disposé parallèlement à l'équateur céleste. Le style, parallèle à l'axe du monde, perce le disque en son centre mais se prolonge de part et d'autre de celui-ci.

On fait tourner le disque jusqu'à ce que la division 12 h se trouve dans la direction du méridien. L'ombre du style marque les heures sur la face supérieure pendant les périodes du printemps et de l'été où la déclinaison du soleil est positive, sur la face inférieure pendant l'automne et l'hiver où la déclinaison du soleil est négative.

1.2.1.4. L'arbalète ou bâton de Jacob

L'arbalète ou bâton de Jacob comporte une tige (T) en bois appelée **"flèche"** à section carrée portant une graduation. Sur cette tige coulisse un curseur (C), appelé **"marteau"**, perpendiculaire à (T) et de longueur l connue (Fig. 13).

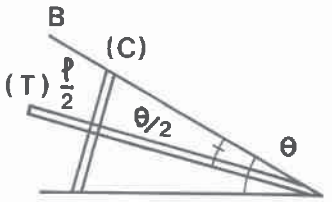


Fig. 13

Pour mesurer en S l'écart angulaire entre deux points terrestres ou deux étoiles, on oriente l'appareil dans le plan ASB, on place l'œil en S et on déplace le curseur C jusqu'à voir les points A et B alignés avec les extrémités du marteau (C). L'angle cherché θ est tel que : $\tan \frac{\theta}{2} = \frac{l}{2R}$, R étant la distance de S au curseur. Au lieu de graduer la tige (T) en unités de longueur on peut la graduer directement en unités d'angles. Pour mesurer un angle vertical tel que la hauteur d'une étoile, il suffit de disposer SA selon une horizontale et de diriger SB dans la direction de l'astre.

Pour mesurer la hauteur du soleil les Babyloniens plaçaient à l'extrémité S de la flèche un petit écran horizontal. Tournant le dos au soleil et ayant rendu AS horizontal, ils déplaçaient le marteau (C) jusqu'à ce que l'ombre portée par l'extrémité supérieure du marteau coïncide avec le centre S de l'écran (fig. 14).

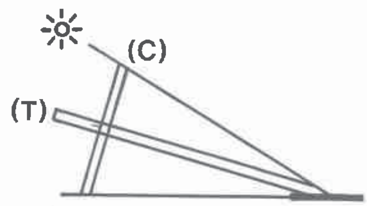


Fig. 14

Le bâton de Jacob sera utilisé couramment par les Grecs et perfectionné au début du 14e siècle par **Levi ben Gerson**, dit **Géronidès**, encyclopédiste et astronome provençal.

1.2.2. Le décompte du temps. La durée du jour

Grâce au gnomon, au polos ou au cadran solaire, les Babyloniens pouvaient déterminer des intervalles de temps et connaître "l'heure" de la journée. Nous avons vu qu'au polos ils divisèrent d'abord l'intervalle de temps séparant le lever du coucher du soleil en 12 parties, définissant ainsi des "heures inégales" ; ce n'est que plus tard qu'ils arrivèrent au polos à déterminer des "heures égales".

Les unités de temps utilisées par les Babyloniens étaient :
la **"veille"** correspondant à 4 heures ou le **"donna"** correspondant à 2 heures
le **"ges"** correspondant à 4 minutes de temps
le **"gar"** correspondant à 4 secondes de temps.

Dans les premiers temps de leur astronomie, pour déterminer l'heure de nuit, les Babyloniens observaient les levers successifs d'étoiles remarquables, choisies de façon que ces levers s'échelonnent à des intervalles égaux. Il y avait encore 36 étoiles divisées en 3 ensembles de 12.

— les étoiles de **Ea** ou du nord

— les étoiles **d'Anu** situées près de l'équateur céleste.

— les étoiles **d'Enlil** ou du Sud

Bigourdan (voir Bibl. 3) juge possible que les Babyloniens aient utilisé les mêmes 36 étoiles pour la division du zodiaque (voir 1.2) et pour la division de la nuit. A chaque mois étaient associés 3 étoiles ; les textes indiquent qu'elles n'étaient visibles que durant le mois concerné, ce qui n'est pas toujours exact. Les étoiles étaient figurées sur un cercle selon 12 secteurs, avec 3 étoiles par secteur, concernant chacun un mois déterminé. Les Babyloniens donnaient à ces cercles un nom particulier que les historiens anglo-saxons ont traduit par **"three stars each"**, alors qu'on désigne très improprement ces cercles par le mot "astrolabe".

Le plus ancien des "three stars each" a été trouvé à **Assur** et date de 1100 ans avant J.-C. Au-dessus du cercle représentant chaque étoile sont inscrits son nom et un nombre (fig. 15). Les 12 nombres de la couronne extérieure croissent d'abord de 2 à 4 par intervalles de 0,20 ; c'est ainsi qu'on trouve successivement : 2 – 2,20 – 2,40 – 3,00 – 3,20 – 3,40 – 4 ; ensuite ils décroissent de la même façon pour revenir à 2. Nous avons là un exemple de fonction à variation linéaire en dents de scie évoquée en 1.2. Les nombres de la couronne intermédiaire sont la moitié des précédents, les nombres de la couronne intérieure sont les quarts de ceux de la couronne extérieure.

Il est vraisemblable que les 3 étoiles de chaque mois observées l'une à son coucher, les deux autres durant la nuit, permettaient avec le lever du soleil de partager la nuit en 3 intervalles égaux de 4 h, donc en 3 veilles correspondant à des heures inégales.

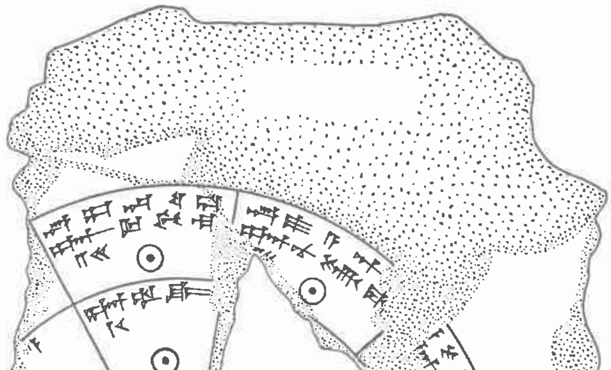


Fig. 15 — Fragment "d'astrolabe" chaldéen, dont il ne subsiste aucun vestige de la couronne circulaire intérieure, comportant comme les deux autres 12 étoiles.

O. Neugebauer (Bibl. 6) a émis l'hypothèse que les nombres de la couronne extérieure pouvaient représenter les poids d'eau à placer chaque mois dans la clepsydre pour avoir en heures inégales la durée de la **veille.** Dans ces conditions les nombres de la couronne médiane représenteraient les poids d'eau relatifs à la **donna,** ceux de la couronne intérieure les poids relatifs à la **demi donna** ou à l'heure ; ainsi la durée de l'heure inégale restait constante pendant la durée du mois, correspondant à la durée de l'heure inégale du 15[e] jour du mois.

Nous verrons ci-après que les Babyloniens avaient à la période séleucide entre la durée du jour solsticial d'été et celui d'hiver un rapport $\frac{M}{m} = \frac{3}{2}$, qui ne correspond pas au rapport $\frac{4}{2}$ ci-dessus. A une époque antérieure ils avaient un rapport $\frac{M}{m} = \frac{14}{10}$.

Il semble donc qu'il n'y a pas concordance entre les deux rapports $\frac{3}{2}$ et 2. En fait Neugebauer (Bibl. 6) explique que le temps d'écoulement : t d'une hauteur d'eau h d'un vase cylindrique supérieur dans un vase inférieur est proportionnel à la racine carrée de la hauteur d'eau, $t = C\sqrt{h}$, où C est une constante (1).

La clepsydre babylonienne se différenciait ainsi de la clepsydre égyptienne (1.113) où on considérait la hauteur atteinte dans le vase inférieur.

Comme le poids d'eau est proportionnel à h, il est proportionnel au carré du temps de vidange de la clepsydre. Ainsi à un rapport de temps $\frac{M}{m} = \frac{3}{2}$ correspond au point de vue poids un rapport $\left(\frac{3}{2}\right)^2 = \frac{9}{4}$ proche de 2. On a pensé que la différence entre $\frac{9}{4}$ et 2 pouvait provenir d'une forme légèrement conique, évasée vers le haut. En fait d'après les textes les clepsydres étaient bien cylindriques ; c'est donc vraisemblablement pour une question de commodité que le rapport $\frac{9}{4}$ a été arrondi à 2. Ainsi on plaçait 2 **manas** (2 unités de poids) pour avoir la durée de la veille durant la nuit la plus courte, celle du solstice d'été qui tombait le 15[e] jour d'un mois, le mois suivant on ajoutait $\frac{1}{3}$ de **mana,** soit 0,20 **mana** en système sexagésimal, le mois suivant encore 0,20 **mana** pour arriver à 3 **manas** pour l'équinoxe d'automne. On continuait de 0,20 en 0,20 **mana** jusqu'au solstice d'hiver qui comporte la nuit la plus longue, pour laquelle on obtenait 4 **manas.** On revenait ensuite par intervalles décroissants à l'équinoxe de printemps (3 **manas**) et enfin au point de départ le solstice d'été : 2 **manas.**

---

(1) La vitesse d'écoulement d'un liquide par un petit trou percé au bas d'un vase cylindrique est donné par la formule de Torricelli :

$v = \sqrt{2gh}$; *or* $v = k\frac{dh}{dt}$, *d'où :* $dt = k\frac{dh}{\sqrt{2gh}}$, *de type* $dt = \lambda\frac{dh}{\sqrt{h}}$,

dont l'intégration donne : $t = C\sqrt{h}$.

Dès le début de la période séleucide, qui se situe de 300 ans environ à 64 ans avant J.-C., les Babyloniens avaient élaboré un système pour calculer — en heures égales cette fois — la durée du jour en fonction de la longitude écliptique du soleil. Cette longitude n'était pas décomptée à partir du degré zéro du signe du bélier, mais à partir d'un point situé à 10° ou à 8° du degré zéro de ce signe.

Le système où l'origine des longitudes est à 10° du zéro du bélier est dit système A.

Le système où l'origine des longitudes est à 8° du zéro du bélier est dit système B.

Les signes du zodiaque étaient nés à partir de constellations assez irrégulieres et il se fit que le point vernal ou point γ occupait l'une des positions définies ci-dessus. On a cru que cette différence de 8 ou 10° correspondait à la différence entre les longitudes babyloniennes et les longitudes modernes : $l_{Bab} - l_{mod} = 10°$ ou 8°. Il n'en est rien, on a montré en fait que : $l_{Bab} - l_{mod} = 4°,30'$ env. Nous avons déjà évoqué à propos du polos la question de la découverte de la **"précession des équinoxes"** par les Babyloniens ; c'est justement la différence des zéros des longitudes dans les deux systèmes qui a fait penser que les Babyloniens avaient découvert la précession ; en fait il n'y a pas de preuve formelle à cela et on ignore quelle relation chronologique existait entre les systèmes A et B. Rappelons que la **précession des équinoxes** consiste en un déplacement du point γ sur l'écliptique de sens opposé à celui du mouvement du soleil sur l'écliptique, qui s'effectue dans le sens direct des mathématiques. Pour cette raison le mouvement du point γ, qui décrit l'écliptique en 26 000 ans environ est dit rétrograde. Nous verrons ultérieurement que c'est **Hipparque,** astronome grec du 2[e] siècle avant J.-C. qui a découvert la précession des équinoxes et qui en a donné la valeur annuelle de façon relativement correcte.

Ajoutons aussi que les Babyloniens, puis les Grecs, suivis des Arabes, ainsi que les astronomes du Moyen Age Occidental ont toujours localisé le soleil par sa situation dans les différents signes du zodiaque, qui sont les suivants avec leurs symboles :

Le Bélier ♈, le Taureau ♉, les Gémeaux ♊, le Cancer ♋, le Lion ♌, la Vierge ♍, la Balance ♎, le Scorpion ♏, le Sagittaire ♐, le Capricorne ♑, le Verseau ♒, les Poissons ♓.

On situe par exemple le soleil jusqu'à Hipparque, non pas par sa longitude $l = 30°$, mais par ♈ 10°, puisque l'origine des longitudes était dans le système A le point ♈ 10°, à 10° du début du signe du Bélier.

A partir d'Hipparque l'origine des longitudes écliptiques, c'est-à-dire le point γ coïncidera avec le degré zéro du signe du Bélier.

Pour calculer la durée du jour d, les Babyloniens n'utilisaient pas les deux relations :

$d = 2H$ et $\cos H = -\tan\delta.\tan\varphi$,

auxquelles nous avons fait appel pour calculer la durée du jour solsticial d'été à **Babylone.** Ils partaient de la notion **"d'ascension oblique"** que nous allons définir. Soit l la longitude écliptique du soleil à un moment donné, pour fixer les idées quand il est à 10° (système A) dans le signe du Taureau ; il se trouve alors à la longitude l_{30} = 30° du point γ.

Proposons-nous de déterminer la durée du jour à ce moment-là, selon la méthode babylonienne. Désignons par L le point d'intersection de l'horizon et de l'écliptique ; c'est en ce point que le soleil se lève. L est tel que $\gamma L = l_{030} = 30°$ (fig. 16).

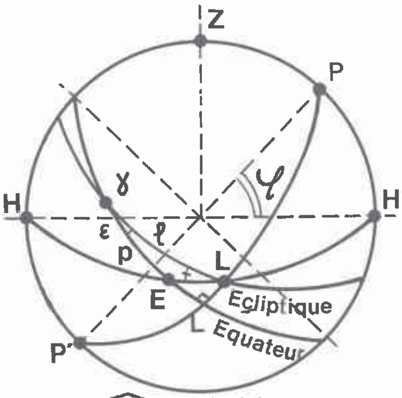


Fig. 16 $\widehat{\gamma LE} = \frac{\pi}{2} - \varphi - \varepsilon$

Désignons par E l'intersection du cercle horizon et de l'équateur. On appelle **"ascension oblique"** correspondant à L l'arc : $\rho = \widehat{\gamma E}$, situé au-dessus de l'horizon. Il est possible de dresser une table donnant ρ en fonction de l. En effet on peut résoudre le triangle sphérique γEL, où l'on connaît les 3 élément $\gamma L = l_{030} = 30°$, l'angle $\gamma = \epsilon$, obliquité de l'écliptique, l'angle en L : $EL\gamma = \frac{\pi}{2} - \varphi - \epsilon$ (φ latitude du lieu). On peut donc calculer par la trigonométrie sphérique ρ en fonction de l. Mais les Babyloniens ne savaient pas résoudre un triangle sphérique. Aussi ont-ils établi géométriquement ou empiriquement une table donnant les quantités $\triangle\rho$: $\triangle 0-30$, $\triangle 30-60$, $\triangle 60-90$, etc... correspondant sur l'équateur aux amplitudes égales : $\triangle l = 30°$ des différents signes du zodiaque. Les résultats ont été portés dans les colonnes 1 des tableaux A et B ci-dessous. Dans le système A les valeurs de $\triangle\rho$ varient en progression arithmétique de 4° de $\triangle 0-30$ à $\triangle 150-180$ et de $-4°$ de $\triangle 180-210$ à $\triangle 330-360$.

Dans le système B il y a une progression arithmétique de raison 3° de $\triangle 0-30$ à $\triangle 60-90$ avec un intervalle de 6° entre $\triangle 60-90$ et $\triangle 90-120$, puis il y a une nouvelle progression arithmétique de raison 3° de $\triangle 90-120$ à $\triangle 150-180$. Ensuite la progression arithmétique est de $-$ 3°, sauf entre $\triangle 240-270$ et $\triangle 270-300$ où il y a encore un intervalle de 6°.

On constate que les $\triangle\rho$ sont inférieurs à 30° sur les trois premières et trois dernières lignes et supérieurs à 30° sur les six lignes intermédiaires.

Dans la figure 16 un observateur se tenant selon la verticale OZ et regardant vers le pôle P, c'est-à-dire vers le Nord, a les points γ et L à sa droite, donc à l'Est. L est bien le lever du soleil.

Dans la figure 17 le même observateur regardant vers le pôle P, a les points γ' et C à sa gauche. C est bien le coucher du soleil.

γ et γ' d'une part, L et C d'autre part sont diamétralement opposés sur l'écliptique.

On vérifie sur la fig. 16 où $l_L < 90°$ — ce qui correspond aux trois premières lignes - que les $\triangle\rho$ sont bien inférieurs à $\triangle l = 30°$.

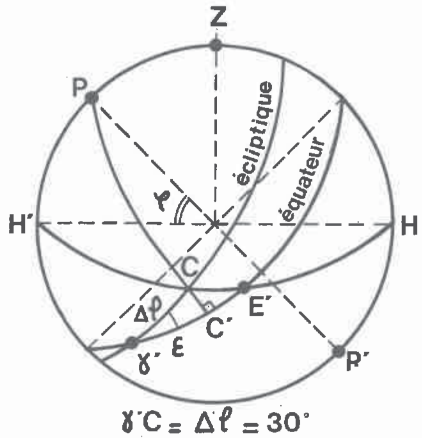


Fig. 17 $\gamma' C = \Delta l = 30°$
$\gamma' E = \Delta\rho = \Delta 180-210$

On vérifie aussi sur la fig. 17 où : 90° < lc < 270° — ce qui correspond à l'une des six lignes intermédiaires — que les $\triangle\rho$ sont bien supérieurs à $\triangle l = 30°$.

Chaque $\triangle\rho$, arc d'équateur, représente une différence d'angle horaire, donc le temps que met à se lever au-dessus de l'horizon le signe du zodiaque correspondant.

La durée du jour **d**, comptée le long de l'équateur, correspond à l'arc $\widehat{EE'}$ d'ascension oblique, où E est homologue de L, de longitude écliptique l = 30° et où E' est homologue de C, de longitude écliptique l = 30° + 180° = 210°.

On a donc : $d = \rho_{210} - \rho_{30}$. En effet l'ascension oblique d'un arc : $\triangle l = l_2 - l_1$ est : $\rho(\triangle l) = \rho(l_2) - \rho(l_1)$. En raisonnant en angles horaires comme on le fait actuellement, la durée du jour correspond à la différence entre l'angle horaire du coucher du soleil Hc et l'angle horaire du lever H_L : $d = H_c - H_L = \widehat{L'C'}$ sur l'équateur ; il est facile de voir que $\widehat{L'C'} = \widehat{EE'}$, car les arcs $\widehat{EL'}$ et $\widehat{C'E'}$ sont égaux.

Les valeurs de $\rho = \Sigma\triangle\rho$, valeurs cumulées, ont été portées dans les colonnes 2 des tableaux A et B. A l_{30} correspond ρ_{30} = 20° ; à l_{210} correspond ρ_{210} = 220°.

On a donc la durée du jour d : $= \rho_{210} - \rho_{30}$
d = 220° − 20° = 200°, porté colonne 3 ; on en déduit :

$d = \frac{200}{15}$ = 13 h 1/3 = 13 h 20 m (colonne 4)

Ayant ainsi déterminé la durée du jour lorsque le soleil est à 10° (système A) dans le signe du Taureau, et qu'il a une longitude écliptique de 30°, calculons la durée du jour lorsqu'il a pour longitude 60°, et qu'il est à 10° (système A) dans le signe des Gémeaux. On a : $d = \rho_{240} - \rho_{60} = 256 - 44$;

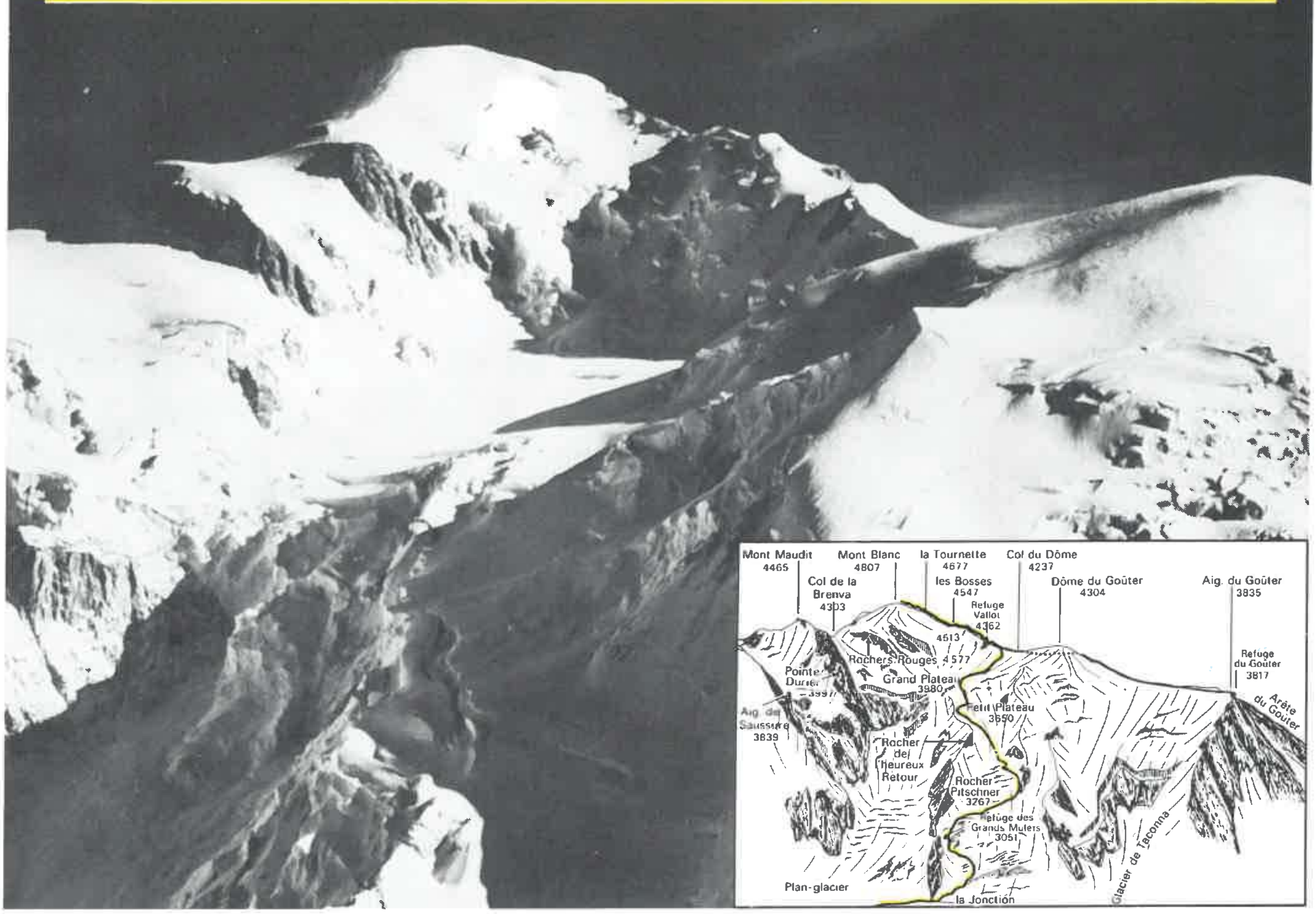
MICROS G

Diffusion

le bon sens informatique

17, chemin des Sources
38240 MEYLAN
Tél. 76 90 25 40

Avec nous, tous les sommets sont accessibles.



MICROS G développe et diffuse depuis 1979 des logiciels professionnels haut de gamme à des prix « micros ».

Pytha-Topo® : des automates de calcul souples et performants.

Pytha-Projet® : études de lotissements et d'ouvrages linéaires.

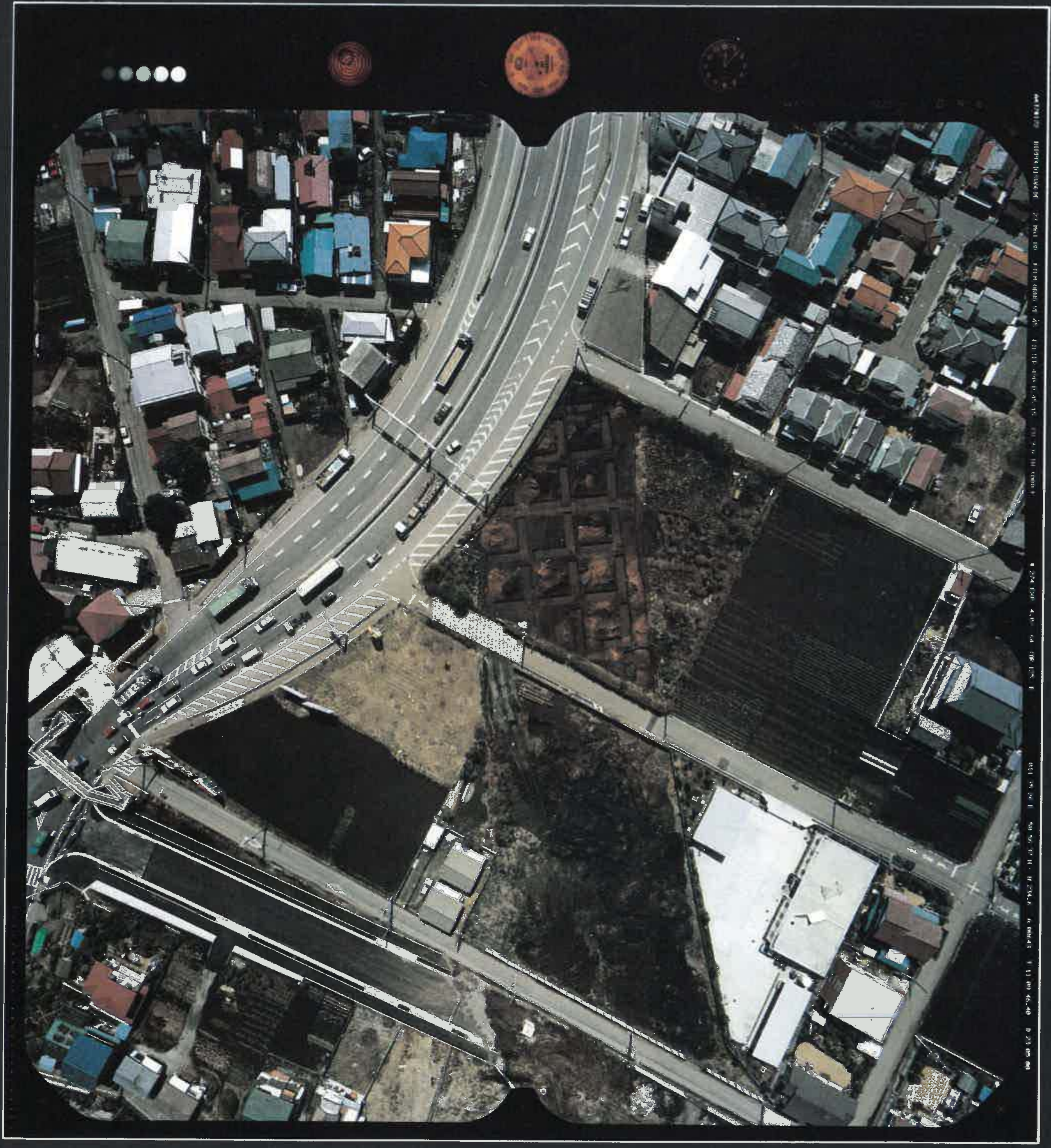
Micrographix® : dessin assisté modulaire et évolutif, cartographie thématique, digitalisation, liaison avec les banques de données sur gros systèmes.

Géomètres Experts : MICROS G Diffusion vous propose micro-ordinateurs compatibles de marque et périphériques graphiques (traceurs, digitaliseurs, écrans...) à des prix préférentiels : consultez-nous.

® Marque déposée de MICROS G

Nom. . . . . Adresse . . . . Téléphone . . . .

Je désire des informations sur :
☐ Pytha-Topo ☐ Micrographix
☐ Pytha-Projet ☐ Matériel



Prise de vue réalisée avec LMK 1000

Système de prises de vues LMK 2000 - module central et unité pilote

Magasin à film universel avec système FMC

Intérieur du cône avec obturateur

SYSTEME DE PRISES DE VUES

LMK 2000...

JENOPTIK

... UN GRAND PAS VERS LA PERFECTION

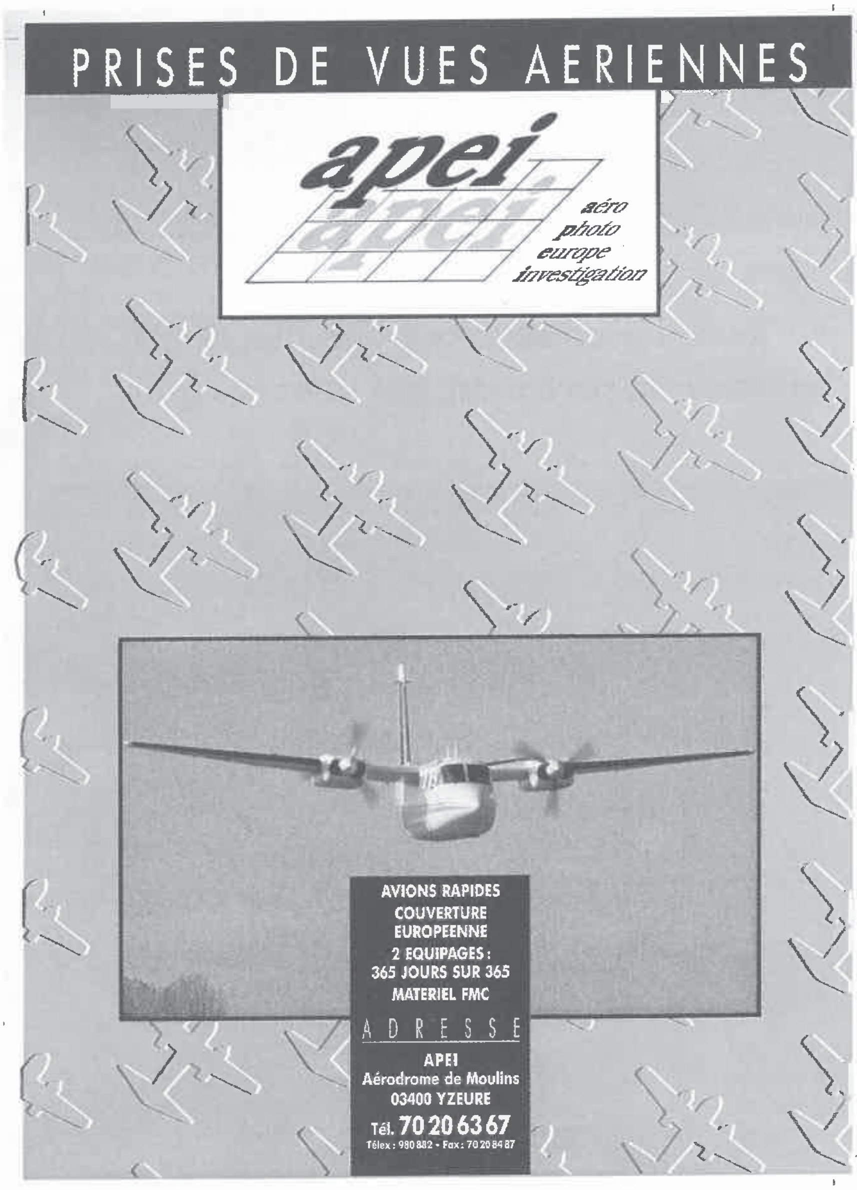
Suspension de la caméra avec AMC, compensation des 3 axes automatique

Chambre aéro-photogrammétrique LMK 2000.
—Compensation du filet (FMC) depuis 1983.
—Compensation et stabilisation positionnels (A.M.C.) angular movement compensation.
—Mesure différentielle de l'intensité de luminosité de l'objet pour la commande de l'exposition... et de nombreuses autres améliorations.

Assistance - Maintenance - Service après-vente sur toute la France

COMPAGNIE GENERALE DE PHYSIQUE

48, boulevard de la Bastille - 75012 PARIS - Tél. (1) 43.44.12.34
Télex : 220 231 Cogephy Paris - Téléfax : (1) 43.45.43.69


PRISES DE VUES AERIENNES
apei
aéro
photo
europe
investigation
AVIONS RAPIDES
COUVERTURE
EUROPEENNE
2 EQUIPAGES :
365 JOURS SUR 365
MATERIEL FMC
ADRESSE
APEI
Aérodrome de Moulins
03400 YZEURE
Tél. 70 20 63 67
Télex : 980 882 - Fax : 70 20 84 87

1	2	3	4	5
$\triangle\rho$	$\rho = \Sigma\triangle\rho$	d en °	d en h	l
$\triangle\rho = 0$	$\rho = 0$	180	12 h	$l_0 = 0°$
$\triangle_{0-30} = 20°$	$\rho_{30} = 20°$	200	13 h 20 m	$l_{30} = 30°$
$\triangle_{30-60} = 24°$	$\rho_{60} = 44°$	212	14 h 08 m	$l_{60} = 60°$
$\triangle_{60-90} = 28°$	$\rho_{90} = 72°$	216	14 h 24 m = M	$l_{90} = 90°$
$\triangle_{90-120} = 32°$	$\rho_{120} = 104°$	212	14 h 08 m	$l_{120} = 120°$
$\triangle_{120-150} = 36°$	$\rho_{150} = 140°$	200	13 h 20 m	$l_{150} = 150°$
$\triangle_{150-180} = 40°$	$\rho_{180} = 180°$	180	12 h	$l_{180} = 180°$
$\triangle_{180-210} = 40°$	$\rho_{210} = 220°$	160	10 h 40 m	$l_{210} = 210°$
$\triangle_{210-240} = 36°$	$\rho_{240} = 256°$	148	9 h 52 m	$l_{240} = 240°$
$\triangle_{240-270} = 32°$	$\rho_{270} = 288°$	144	9 h 36 m = m	$l_{270} = 270°$
$\triangle_{270-300} = 28°$	$\rho_{300} = 316°$	148	9 h 52 m	$l_{300} = 300°$
$\triangle_{300-330} = 24°$	$\rho_{330} = 340°$	160	10 h 40 m	$l_{330} = 330°$
$\triangle_{330-360} = 20°$	$\rho_{360} = 360°$	180	12 h	$l_{360} = 360°$

TABLEAU A

1	2	3	4
$\triangle\rho$	$\rho = \Sigma\triangle\rho$	d en °	d en h
$\triangle\rho = 0$	$\rho = 0$	180	12 h
$\triangle_{0-30} = 21°$	$\rho_{30} = 21°$	198	13 h 12 m
$\triangle_{30-60} = 24°$	$\rho_{60} = 45°$	210	14 h
$\triangle_{60-90°} = 27°$	$\rho_{90} = 72°$	216	14 h 24 m = M
$\triangle_{90-120} = 33°$	$\rho_{120} = 105°$	210	14 h
$\triangle_{120-150} = 36°$	$\rho_{150} = 141°$	198	13 h 12 m
$\triangle_{150-180} = 39°$	$\rho_{180} = 180°$	180	12 h
$\triangle_{180-210} = 39°$	$\rho_{210} = 219°$	162	10 h 48 m
$\triangle_{210-240} = 36°$	$\rho_{240} = 255°$	150	10 h
$\triangle_{240-270} = 33°$	$\rho_{270} = 288°$	144	9 h 36 m = m
$\triangle_{270-300} = 27°$	$\rho_{300} = 315°$	150	10 h
$\triangle_{300-330} = 24°$	$\rho_{330} = 339°$	162	10 h 48 m
$\triangle_{330-360} = 21°$	$\rho_{360} = 360°$	180	12 h

TABLEAU B

d = 212°, qu'on porte dans la colonne 3 ; on en déduit :

$d = \frac{212}{15} = 14$ h 1333 = 14 h 08 m (colonne 4)

De même au solstice d'été : l = 90°, le soleil est à 10° dans le signe du Cancer ; on a :
$d = \rho_{270} - \rho_{90} = 288 - 72 = 216°$ (colonne 3).
Il en résulte la durée du jour solsticial d'été, le plus long :
M = 14 h 24 m (colonne 4).

On trouve de même les durées correspondant à l_{120}, l_{150}, l_{180}. Après l'équinoxe d'automne les jours raccourcissent et l'on obtient les compléments à 24 h des durées précédentes. En particulier pour l_{270} la durée du jour solticial d'hiver est m = 9 h 36 m.

L'établissement des durées du jour du tableau B ne présente aucune difficulté particulière.

Les textes babyloniens ne donnent pas les durées des jours en heures, mais en veilles, unités de 4 h ; nous les avons données en heures pour la commodité du lecteur.

On remarque qu'aussi bien dans le tableau A que dans le tableau B on a les mêmes durées du jour solsticial d'été : M = 14 h 24 m et du jour solsticial d'hiver m = 9 h 36 m. On remarque en outre que le rapport de ces deux durées est :

$$\frac{M}{m} = \frac{14\text{ h }4}{9\text{ h }6} = \frac{3}{2}$$

Comparons la durée M ainsi obtenue par les Babyloniens à celle que nous avons calculée en 1.21, soit M' = 14 h 12 m sans réfraction et M'' = 14 h 18 m avec réfraction. La durée M obtenue est donc vraisemblablement celle de la durée du jour avec réfraction, puisque la différence M'' – M n'est que de 6 mn. Ainsi l'astronomie mathématique qui naquit en Chaldée vers les débuts de la période séleucide n'avait-elle pas encore une grande rigueur. Il semble que les astronomes-astrologues Chaldéens aient été fascinés par la magie des nombres ; ils tenaient à exprimer la valeur des paramètres astronomiques par des fonctions linéaires en dents de scie ou par des progressions arithmétiques ; en outre les rapports entre quantités homologues devait être simple, comme le raport $\frac{M}{m} = \frac{3}{2}$; or si on admet que les durées de jour sont obtenues en tenant compte de la réfraction, la plus longue nuit devrait être plus courte que le jour le plus long, ce qui n'est pas le cas. Il est certain que ces pratiques ont nui à la précision de l'astronomie mathématique chaldéenne.

Il est intéressant de remarquer que **Ptolémée** a déduit la latitude de **Babylone** de la durée M du jour solsticial, en l'interprétant comme une durée sans réfraction.

Reprenons d = 2H avec $\cos H = -\tan\delta \tan\varphi$, d'où on déduit :
$\tan\varphi = -\cos H.\cot an\delta$

En utilisant une formule analogue avec :

$$\varphi = \epsilon = 24° \text{ et } H = \frac{M}{2} = \frac{14\text{ h }4}{2} = 7\text{ h }2 = 108°,$$

Ptolémée a obtenu : $\tan\varphi = -\cos 108°.\cot an 24°$, d'où $\varphi = 34°,7$ qu'il a arrondi à 35°, alors que la latitude de **Babylone** n'est que de 32°,5. C'est la valeur de 35° que **Ptolémée** assigne à Babylone dans sa "Géographie", sans chercher à faire vérifier cette valeur au gnomon ou au scaphé.

Pendant plusieurs centaines d'années on a ainsi conservé une erreur de 2°,5 sur la latitude de **Babylone,** capitale pourtant importante de l'antiquité. Or 1° de différence de latitude représente sur la surface terrestre une distance de 111,111 km, d'où une erreur en km de :
2,5 × 111,111 = 277,7 km

Aux unités de temps correspondaient exactement des unités d'angles selon le tableau ci-après :

(1) En prenant $\delta = 23°,5$, on trouve $\varphi = 35°,4$ ce qui augmente l'écart avec la latitude de 32°,5.

Unités de temps	Valeurs en unités actuelles	Unités d'angle correspondantes
1 veille	4 heures $= 4 \times \frac{\pi}{12} = \frac{\pi}{3}$ rd	le sextant $= 60^\circ = \frac{\pi}{3}$
1 ges	4 mn $= \frac{\pi}{180}$ rd	le degré $= \frac{\pi}{180}$
1 gar	4 sec $= \frac{\pi}{180 \times 60}$	la minute sexagésimale $= \frac{\pi}{180 \times 60}$

Après avoir comme les Egyptiens utilisé d'abord la **''décade''** ou période de 10 jours, les Babyloniens ont été les premiers à utiliser la semaine dont la durée correspond approximativement à celle des phases de la lune. Les sept jours sont affectés à chacune des 7 ''lumières mobiles du ciel'' : le soleil, la lune, Mars, Mercure, Jupiter, Vénus, Saturne. Les Allemands avec sonntag et les Anglais avec sunday ont conservé l'appellation relative au soleil de notre dimanche. La lune donna lundi et les cinq autres ''astres mobiles'', les planètes, respectivement mardi, mercredi, jeudi, vendredi, samedi (saturday en anglais).

1.2.3. Conception de l'univers par les Assyro-Babyloniens et les Hébreux

Les Babyloniens, qui ne se sont guère souciés d'avoir une explication rationnelle de l'univers, concevaient celui-ci comme un dôme solide recouvert des eaux supérieures, la terre étant une montagne creuse placée au centre et flottant sur les eaux profondes. Les eaux supérieures donnaient parfois la pluie, les eaux inférieures montaient sous forme de sources.

Les Hébreux ne pratiquaient pas l'astronomie, mais d'après leurs livres sacrés **Schiaparelli** cité par **P. Brunet** et **Aldo Mieli** (Bibl. 5) a pu reconstituer leur conception de l'univers. La terre en forme de cercle (AC) repose sous la voûte **solide** (1) du firmament (FF') ou **''ciel inférieur''** (fig. 18). Au-dessus se trouve la voûte ABC du **''ciel supérieur''**. Entre les deux ciels est situé le réservoir des eaux célestes : (LL') et le réservoir des vents (KK'). Les différentes parties de la terre (T,T',T'') enserrent des mers (M,M'). Le réservoir des eaux profondes (N) alimente mers, fleuves, rivières, sources, conception qui prévaudra jusqu'à **Aristote**. Sous le réservoir des eaux profondes se trouve le **''scéol''** ou **''shéol''**, pays des ténèbres (PP') sous lequel se situe le puits inférieur ou **''enfer''** (Q).

Les Hébreux avaient un calendrier lunaire, le début du mois commençant avec la nouvelle lune, l'année était réglée sur le cours des saisons.

1.3. Topographie et cartographie dans la Haute Antiquité

Dans les Etats fortement centralisés comme l'Egypte, l'Assyrie des levés topographiques étaient indispensables :

— pour organiser l'espace agraire en effectuant des arpentages ;
— pour irriguer les terres ;
— pour construire les villes nouvelles et les grands monuments, tels les pyramides ;
— pour effectuer de grands travaux ; ponts, canaux, aqueducs, barrages.

*(1) Cette notion du ciel solide sera reprise par **Aristote** et par la cosmologie chrétienne du haut Moyen Age (**Isidore de Séville**).*

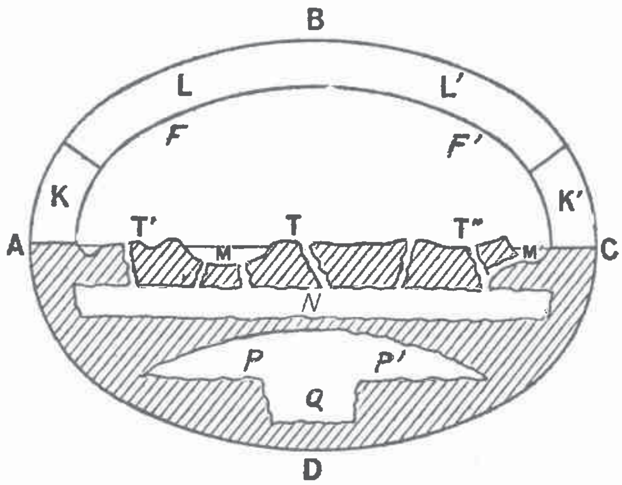


Fig. 18 - Le monde selon les Hébreux.

Dès lors qu'on pouvait mesurer des angles horizontaux avec **"l'arbalète"** (1.2.1.4) et qu'on savait mesurer des distances avec un étalon de longueur on pouvait faire de la topographie.

Arpentage

En général c'étaient des équipes de scribes et d'arpenteurs placés sous les ordres de prêtres qui procédaient aux opérations d'arpentage. Dans les hypogées égyptiennes, on a retrouvé des statuettes **"d'arpédonautes"** et des fresques représentant ceux-ci effectuant des arpentages.

En Egypte **Hérodote** signale vers 1700 avant J.-C. l'enregistrement officiel des parcelles de terrain avec mention de leur cote, sorte de matrice cadastrale.

Le papyrus **RHIND** datant de 1800 avant J.-C. et conservé au **British Museum** à Londres, donne une information assez précise sur les méthodes utilisées par les arpédonautes. Chaque année, après la crue du Nil, ils procédaient à un nouveau mesurage des champs. Ils utilisaient une corde d'arpenteur faite de joncs et de chanvre tressés d'une longueur de 100 verges (52 m) ; les fresques représentant des scènes d'arpentage permettent de voir que la corde était subdivisée par des nœuds.

Les angles droits étaient obtenus en construisant des triangles dont les côtés avaient respectivement 3, 4, 5 intervalles de nœuds (1). Le levé des détails était effectué par le procédé que nous appelons actuellement : par "abscisses et ordonnées".

Construction de grands monuments

Pour implanter les grands monuments les Egyptiens creusaient autour une tranchée remplie d'eau qui leur servait de surface de référence. La verticale était matérialisée au fil à plomb, le long duquel on mesurait les dénivelées grâce à une règle graduée. Pour orienter les bâtiments, les Egyptiens observaient le soleil à sa culmination au moyen d'un gnomon et ils en déduisaient la direction du Sud, parallèlement à laquelle ils implantaient l'une des faces de leur pyramide. Par contre en Assyrie c'étaient les pointes des bases carrées qui étaient dirigées vers les points cardinaux.

En Egypte l'orientation de la pyramide à degrés de **Sakkara** n'est assurée qu'à 4° près, alors que les pyramides de **Gizeh** ont une précision d'orientation de 4',60 fois meilleure. Cette augmentation de précision est très vraisemblablement due à une amélioration de la technique d'orientation. En effet si on détermine la direction du méridien par l'instant où l'ombre du gnomon est minimale, on a une précision très médiocre, ce qui dut être le cas lors de l'implantation de la pyramide de **Sakkara**. On peut penser que pour l'orientation des pyramides de **Gizeh** les Egyptiens ont déterminé la direction du Sud en observant le soleil avant et après son passage au méridien sous des hauteurs égales h.

Ils matérialisaient au sol les directions correspondantes : sa et sb, la bissectrice sx de l'angle asb étant la direction du méridien (fig. 19).

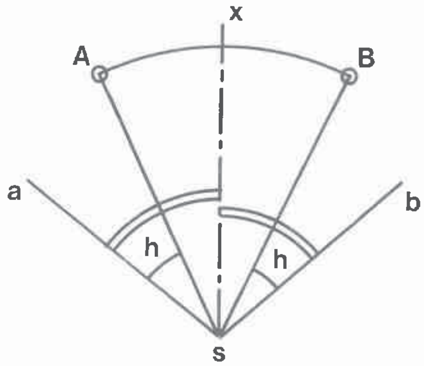


Fig. 19

Aux environs de 2200 avant J.-C. fut érigé un barrage de retenue pour contrôler les inondations du Nil. Un "niloscope" ou "nilomètre", encore visible actuellement, fut construit sur une île pour pouvoir connaître à chaque instant le niveau des eaux du fleuve.

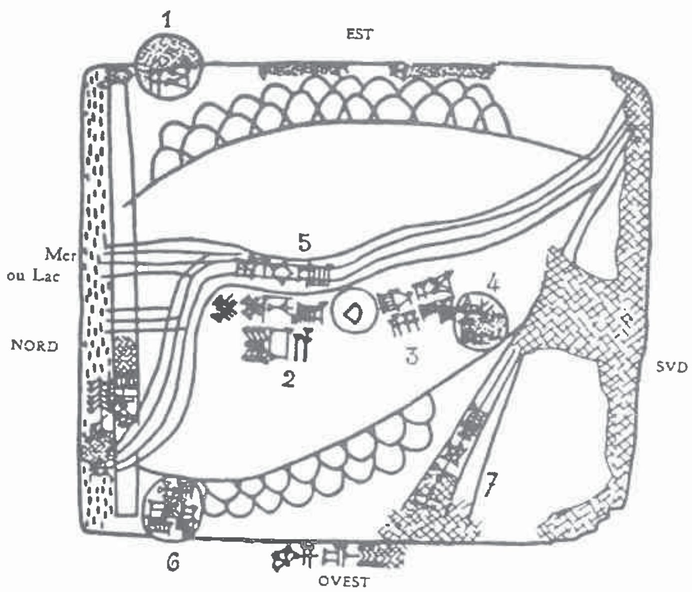


Fig. 20 - Tablette de Nuzi (2200 av. J.-C.).

---

(1) Les Egyptiens connaissaient déjà les propriétés du théorème de Pythagore.

Cartographie

On convient de considérer comme la plus ancienne carte du monde une tablette d'argile d'environ 7 × 8 cm de côté, assez grossièrement gravée, trouvée à **Nuzi** en Assyrie, près de l'actuelle **Kirkuk** en Irak (fig. 20) et remontant à environ 2200 ans avant J.-C.

Un autre document cartographique de la haute antiquité date de l'époque de **Ramsès II** (1300 ans avant J.-C.). Il s'agit d'une carte sur papyrus qui se trouve actuellement au Musée de Turin et qu'à tort on a pris l'habitude d'appeler : "papyrus de Turin dit des mines d'or". Le dessin est en noir avec quelques couleurs ; les hiéroglyphes sont en rouge (fig. 21). Le papyrus comporte deux parties, mais il est à peu près certain qu'elles ne faisaient qu'une carte.

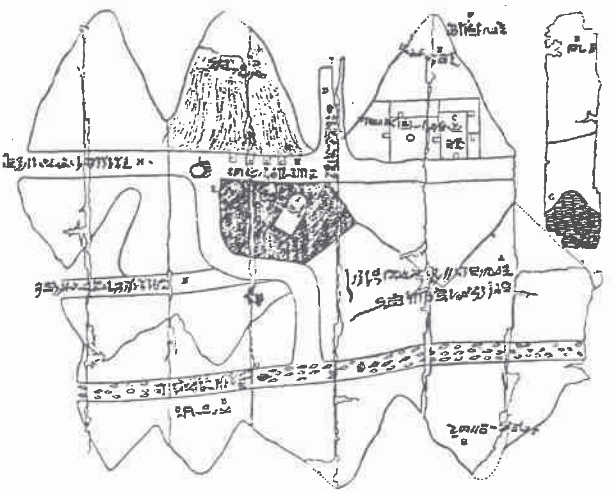


Fig. 21 - Carte d'une mine d'or en Nubie (XIVe s. av. J.-C.).

On a cru tout d'abord que les montagnes traitées en rouge sur le papyrus étaient celles où l'on extrait de l'or, d'où le nom donné au papyrus. D'après des recherches plus récentes la carte ne se rapporterait qu'au procès-verbal du transport d'une grosse pierre entre la carrière d'**Hammamat** et la vallée du Nil. La carrière d'Hammamat se trouve à peu près à égale distance entre **Kena** (ou **Quena**) sur le Nil et la Mer Rouge. Le bloc de pierre était destiné à une statue de roi, mais à la suite d'un incident cette statue seulement ébauchée ne parvint pas à destination. La nature de la pierre de "**bekker**" étant mentionnée en hiéroglyphe sur le papyrus, il ne restait plus qu'à localiser géologiquement une carrière où l'on a exploité cette pierre. Le seul endroit trouvé est le site d'**Hammamat.**

1.4. Conclusion

L'apport de la haute antiquité assyro-babylonienne à l'astronomie est loin d'être négligeable, puisque **Ptolémée** put utiliser les observations des astronomes babyloniens. Ceux-ci avaient déterminé l'écliptique, le zodiaque, établi des tables donnant les positions des "astres mobiles" du ciel et plus précisément des éphémérides de la lune, indiquant correctement pour un siècle les dates de ses éclipses.

Quant aux Egyptiens ils sont à l'origine d'une topographie pratique, utilisant quelques règles élémentaires de géométrie.

Il appartiendra aux Grecs d'établir les fondements d'une géométrie théorique, puis grâce à l'expédition d'Alexandre, qui leur permit d'avoir le contact avec les infatigables observateurs et calculateurs babyloniens, se développera l'astronomie grecque. Celle-ci, grâce au génie spéculatif des philosophes grecs, cherchera à comprendre les mécanismes de l'univers et en élaborera des modèles rationnels. C'est ce que nous verrons dans les prochains articles.

BIBLIOGRAPHIE

1. *Astronomie par **Jérôme le Français (Lalande)**. Paris 1792.*

2. *Histoire de l'astronomie ancienne par **M. Delambre**. Paris 1817.*

3. *L'astronomie, évolution des idées et des méthodes par **G. Bigourdan**, Paris 1911.*

4. *Gnomonique ou traité théorique et pratique de la construction des cadrans solaires, par **G. Bigourdan**, Paris 1922.*

5. *Histoire des Sciences par **Pierre Brunet** et **Aldo Mieli**. Paris 1935.*

6. *The Water Clock in Babylonian Astronomy, par **O. Neugebauer**, Isis 37 (1947), p. 37-43.*

7. *De l'architecture Livre IX par **Vitruve**, traduction de J. Soubiran, Paris 1969.*

8. *Les sciences géographiques dans l'Antiquité par **Roland Lesprit**. Revue Géomètre nos 7, 8, 9, 12. Paris 1972.*

9. *Dictionnary of scientific Biographie XV Supplt I Mathematics and astronomy in Mesopotamia, New York 1978.*

10. *Historique de la cartographie par **G. Alinhac**. Paris 1986.*

11. *A History of Ancient mathematical astronomy par, **O. Neugebauer**, Berlin - Heidelberg - New York 1975.*

Dessins réalisés par Topo-Nord, 59370 Mons-en-Barœul.