ACCUEIL

Frédéric Elie on ResearchGate

Cadrans solaires

Frédéric Élie

mai 1995

« Si vous de dites rien à votre brouillon, votre brouillon ne vous dira rien ! »
Jacques Breuneval, mathématicien, professeur à l'université Aix-Marseille I, 1980

Abstract : Je propose ici de comprendre le fonctionnement des différents types de cadrans solaires, sous toutes les latitudes et en toutes saisons. Il faudra être courageux car cela nous entraînera dans les calculs de trigonométrie qui s'avèrent indispensables dès lors que l'on s'intéresse à l'orientation du soleil dans le ciel ! Mais la récompense sera à la fin où il vous est montré comment fabriquer soi-même un cadran solaire portatif à l'aide d'une simple boîte plate. Bien sûr, cette montre un peu particulière ne servira pas de bijou à votre poignet et ne fonctionne que par beau temps et dans la journée. A part la satisfaction de la curiosité intellectuelle, et l'apprentissage d'un savoir faire en calculs sphériques pour vos éventuels besoins en navigation ou d'astronomie, la seule consolation est de pouvoir au moins être à l'heure pendant ces circonstances!…

SOMMAIRE

1 - Relation de base entre l'azimut et l'angle horaire du soleil pour un style vertical

L'angle entre l'ombre portée sur le sol d'un style vertical, pointant vers le zénith, et le plan méridien est directement l'azimut A. Dans ce cas, qui est celui du cadran solaire horizontal à style vertical pointant vers le zénith, les lignes horaires définissant l'heure H sont données par les calculs qui suivent.

Les lignes horaires de cadrans solaires de géométries différentes se déduisent alors de cette relation fondamentale liant H et A obtenue pour un style vertical.
Géométrie du problème (figure 1 ci-après), le soleil est sur l'écliptique.

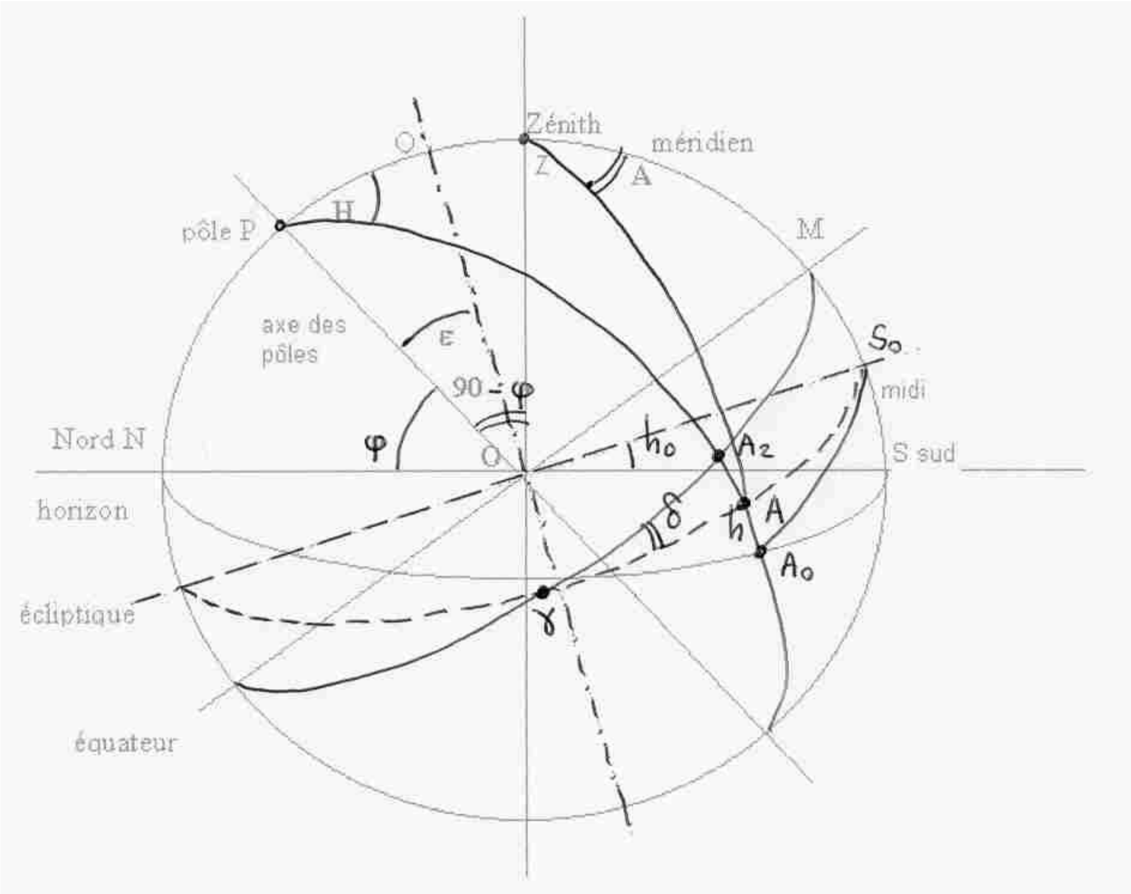


figure 1

Dans la figure 1 le soleil est en A sur l'écliptique. A une époque considérée de l'année la position de la terre sur son orbite est telle que la déclinaison et l'ascension droite du soleil sont (δ ,α). Par conséquent, le soleil culmine à midi en S_0 et la mesure de sa hauteur à midi au-dessus de l'horizon, h_0 permet de calculer δ :

$$\delta = h_0 + \varphi - 90° \qquad (1)$$

ce qui permet de calculer le temps sidéral. Il se couche en A_c lorsque h = 0. L'arc (A_cAS_0) est parallèle à l'équateur céleste (γ A_2M) puisque le mouvement diurne s'effectue suivant lui.
A noter qu'aux équinoxes: $\delta = 0$, et qu'aux solstices $\delta = \pm \varepsilon$ (où ε = 23°27' = 23,5° inclinaison de l'axe des pôles géographiques de la terre sur l'écliptique).
Ceci étant précisé l'application des ***relations de Gauss*** de la trigonométrie sphérique au triangle sphérique PZA va permettre d'établir le lien entre l'angle horaire H et l'azimut A, angle formé entre le plan méridien SOZ et l'ombre portée d'un style vertical pointant vers le zénith, donc parallèle à OZ. Dans le triangle PZA les angles mis en relation sont :

$$B = \text{APZ} = \text{H} \rightarrow \cos B = \cos \text{H},\ \sin B = \sin \text{H}$$
$$A = \text{PZA} = 180 - \text{A} \rightarrow \cos A = -\cos \text{A},\ \sin A = \sin \text{A}$$
$$\text{a} = (\text{PA}) = 90 - \delta \rightarrow \cos \text{a} = \sin \delta,\ \sin \text{a} = \cos \delta$$
$$\text{b} = (\text{ZA}) = 90 - \text{h} \rightarrow \cos \text{b} = \sin \text{h},\ \sin \text{b} = \cos \text{h}$$
$$\text{c} = (\text{PZ}) = 90 - \varphi \rightarrow \cos \text{c} = \sin \varphi,\ \sin \text{c} = \cos \varphi$$

Les relations de Gauss donnent alors:

$$\left.\begin{array}{l}\cos\delta\cos H = \sin h\cos\varphi + \cos h\sin\varphi\cos A\\ \cos\delta\sin H = \cos h\sin A\\ \sin\delta = \sin h\sin\varphi - \cos h\cos\varphi\cos A\end{array}\right| \quad (2)$$

Des relations (2) on déduit la relation entre A et H cherchée par élimination de h; cette relation est paramétrée par la déclinaison δ (fonction de la date dans l'année) et la latitude du lieu φ :

$$\tan A = \frac{\sin H}{\cos H\sin\varphi - \tan\delta\cos\varphi} \quad (3)$$

Remarques :

- A et H sont de même signe
- $\delta = 0$ (équinoxes): $\tan A = \tan H / \sin\varphi$, donc A = 90° si H = 90° (18 h).

Des relations (2) et (3) on tire la loi donnant l'évolution de la hauteur h avec l'angle horaire H:

$$\cos h = \cos\delta\sin H / \sin A \qquad (4)$$

où sin A est fonction de (H, δ , φ) d'après (3) ($\sin A = \tan A / (1+\tan^2 A)$), d'où la relation:

$$\cos h = \sqrt{\cos^2\delta\sin^2 H + \cos^2 H\sin^2\varphi\cos^2\delta + \cos^2\varphi\sin^2\delta - 2\cos\varphi\sin\varphi\sin\delta\cos\delta\cos H} \quad (5)$$

A l'angle horaire du soleil H (heure solaire vraie), la hauteur h est donnée par la longueur L' de l'ombre portée sur le sol d'un style vertical de longueur L, faisant l'angle A (azimut) avec la direction sud (plan méridien):

$$\tan h = L / L'$$

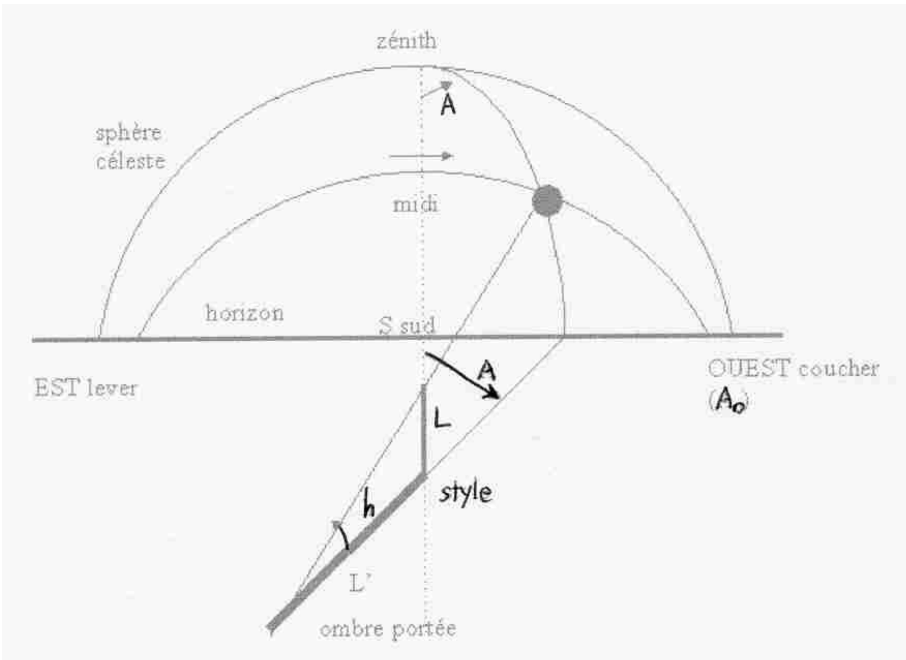


figure 2

Cas particulier du lever et du coucher du soleil : h = 0; les relations ci-dessous (6) permettent de prévoir les heures de lever et de coucher du soleil pour une latitude et une déclinaison (date) données:

$$
\begin{array}{l|c}
\cos H = -\tan\varphi \tan\delta & \\
\sin A = \cos\delta \sin H & (6) \\
\cos A = -\sin\delta / \cos\varphi &
\end{array}
$$

Cas particulier de la déclinaison nulle du soleil $\delta = 0$ (équinoxes): lignes horaires pour l'équinoxe

$$\tan A = \tan H / \sin\varphi$$

et évolution de la hauteur avec l'heure:

$$\cos h = \sqrt{1 - \cos^2 H \cos^2 \varphi}$$

Quelle que soit l'époque de l'année pour déterminer A et h en fonction de H, φ , δ , il faut connaître à la date considérée la valeur de la déclinaison du soleil δ (et son ascension droite α si l'on veut tenir compte de la rétrogradation du point vernal γ due à la précession des équinoxes). Si en première approximation on ne s'intéresse qu'à la déclinaison l'évolution de celle-ci en fonction de la date est donnée par la ***formule de Cook***:

$$\sin\delta = 0{,}4 \sin(360\ N/\ 365) \quad (7)$$

ou encore :

$$\delta \approx 23{,}5 \sin N$$

où N est le nombre de jours séparant l'équinoxe du printemps (21 mars) de la date considérée en comptant dans le sens printemps $\rightarrow$ hiver $\rightarrow$ automne $\rightarrow$ été.

Remarque :
Pour l'équinoxe $\delta = 0$ et pour une latitude fixée φ , la longueur de la projection de l'ombre portée sur le plan méridien est constante:

$$L' \cos A = \text{cste (figure 3).}$$

En effet:

$$L' = 1/\tan h = \tan\varphi / \cos A \quad (8)$$

donc OS = L' cos A = tan φ = cste.

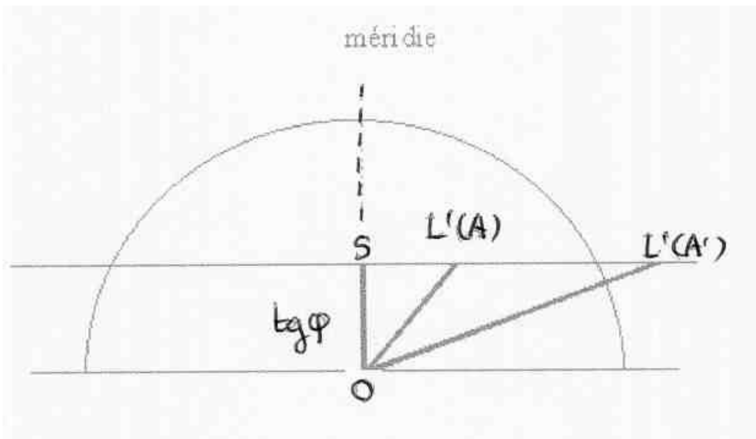


figure 3

Par contre pour $\delta \neq 0$ on n'a plus (8).

2 - Lignes horaires pour un cadran à style incliné

A partir des relations de base établies pour un cadran horizontal à style vertical pointant vers le zénith, on peut, par des transformations appropriées, prévoir les lignes horaires données par

l'ombre portée d'un style incliné, soit fixé à un plan vertical, soit fixé à un plan vertical, ou encore un style à montage équatorial.
Considérons (figure 4) un style faisant avec la verticale l'angle 90 - φ et avec l'horizontale l'angle φ , le style étant dans le plan méridien OBO'B'. L'ombre portée au plan horizontal est sur la droite OH et au plan vertical sur la droite B'H. Les azimuts faits avec le plan méridien sont respectivement A' et A''. Le problème est alors de déterminer la relation entre A' et A ou A'' et A.

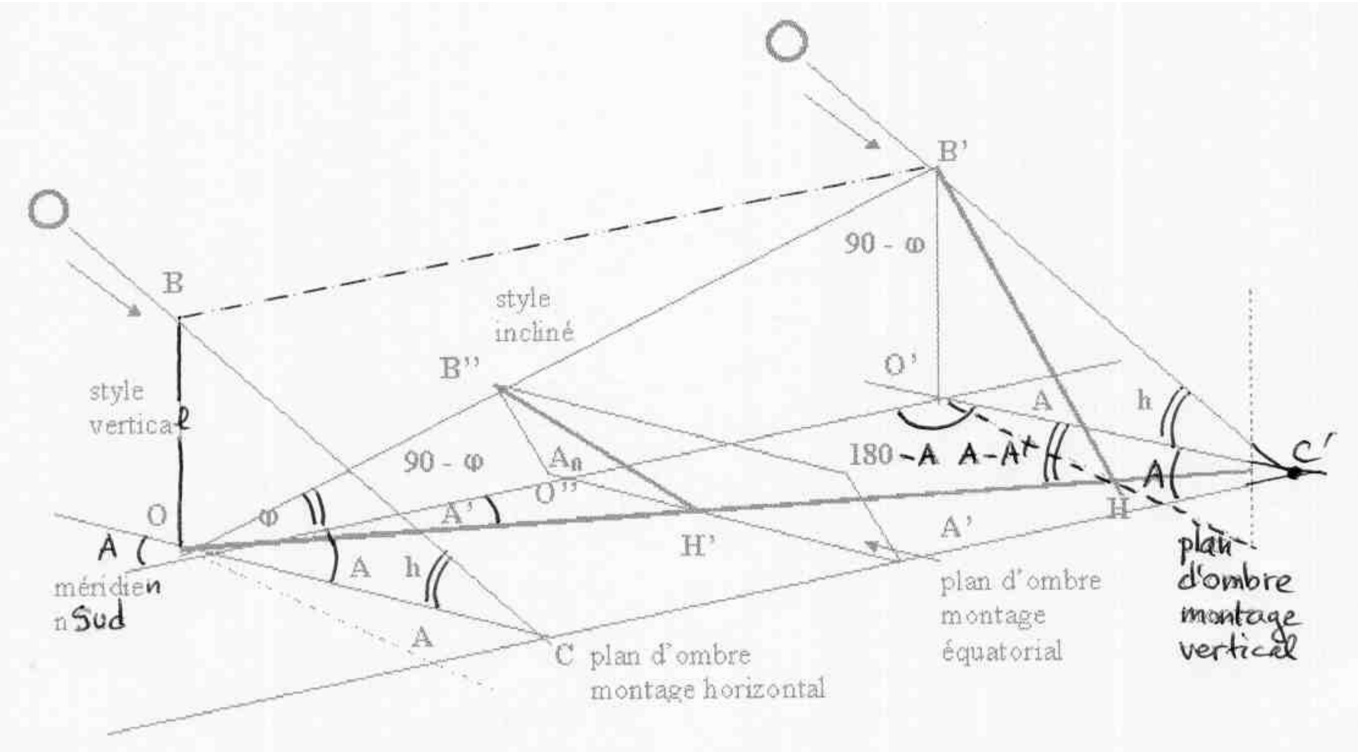


figure 4

2-1 - Lien entre A' et A pour la projection de l'ombre sur le plan horizontal du style incliné d'un angle φ avec lui

Pour l'ombre horizontale il faut considérer le triangle OO'C'. Or on a:

$$OC = O'C' = OB \cot h$$
$$OO' = CC' = OB \cot \varphi$$

et:

$$\sin (A-A')/OO' = \sin A'/O'C'$$

soit:

$$\tan A' = \sin A \tan \varphi / (\cos A \tan \varphi + \tan h)$$

c'est-à-dire la loi des nouvelles lignes horaires :

$$\tan A' = \tan H \sin \varphi \qquad (9)$$

donc pour un cadran horizontal de style incliné de φ les lignes horaires ne dépendent plus de la déclinaison donc de la date. C'est là que réside l'avantage des cadrans à style inclinés de la latitude.
Longueur OC' de l'ombre portée du style incliné de l'angle φ par rapport à l'horizontale: dans le triangle OCC' on a :

$$OC'/\sin (180-A) = OC/\sin A'$$
$$\text{d'où : } OC' = OC \sin A/\sin A' \text{ avec } OC = L'$$

Or sin²A = 1/(1/tan²A' +1) d'où:

$$OC' = \sqrt{L'^2 + \cot^2\varphi + 2L'\cot\varphi\cos A} \quad (10)$$

puisque L' = 1/tan h.

2-2 - Lien entre A" et A pour la projection de l'ombre sur le plan vertical du style incliné d'un angle (90 - φ) avec lui

Dans le triangle B'O'H:

tan A" = O'H/O'B' et O'H = OO' tan A'
d'où : tan A" = OO' tan A'/O'B'
O'B' = OB et OO' = OB cot φ → tan A" = tan A'/ tan φ

D'où la loi des nouvelles lignes horaires:

tan A" = sin A / (cos A tan φ + tan h)

c'est-à-dire en fonction de l'angle horaire H:

$$\tan A'' = \tan H \cos\varphi \quad (11)$$

Ombre portée du style incliné sur le plan vertical, de longueur B'H: dans le triangle B'O'H on a B'H = O'B'/cos A" = OB/ cos A" = 1/cos A" puisque l'on a posé OB = 1 style de longueur unité. Or : cos²A" = 1/(1 + tan²A") donne B'H² = 1 + (sin A/(cos A tan φ + tan h))², et de L' = 1/tan h :

$$B'H = \sqrt{1 + \left(\frac{\sin A}{\cos A \tan\varphi + 1/L'}\right)^2} \quad (12)$$

2-3 - Lien entre A_0 et A pour la projection de l'ombre sur le plan équatorial du style perpendiculaire à lui

Dans le montage équatorial le plan d'ombre du style (plan équatorial) fait l'angle 90 - φ avec le plan horizontal (puisque l'équateur céleste et l'horizon font cet angle entre eux).
Soit A_0 l'azimut avec le méridien de l'ombre portée du style sur le plan équatorial. Dans le triangle B"O"H' on a: tan A_0 = O"H'/O"B"; or: O"H' = OO" tan A' et O"B" = OO" sin φ , d'où:

tan A_0 = tan A'/sin φ

c'est-à-dire pour la loi des nouvelles lignes horaires:

tan A_0 = sin A/(cos A sin φ + tan h cos φ)

soit encore: tan A_0 = tan H, ce qui donne :

$$A_0 = H \quad (14)$$

Ainsi, pour un cadran équatorial, les lignes horaires coïncident avec l'heure solaire quelle que soit la date (indépendante de la déclinaison).
Calculons la longueur B"H' de l'ombre portée du style perpendiculaire au plan équatorial sur celui-ci (la longueur du style de part et d'autre du plan équatorial est L = OB"): dans le triangle B"O"H', on a:

B"H' = O"B"/cos A_0 et O"B" = OB" tan φ d'où:

$$B''H' = OB'' \tan \varphi / \cos A_0$$

soit:

$$B''H' = OB''\sqrt{1+\left(\frac{\sin A}{\cos A \sin\varphi + \cos\varphi / L'}\right)^2}\tan\varphi \qquad (15)$$

3 - Construction géométrique pratique des lignes horaires

Le tracé des lignes horaires sur le cadran peut se faire directement sans calcul.

3-1 - Cadran horizontal style vertical (équinoxe, δ = 0°)

On traduit la relation (3) (avec $\delta = 0$) par un tracé géométrique:

$$\tan A = \tan H / \sin \varphi \quad \text{(3 bis)}$$

Sur la figure 5 on construit : MK = R, OM = L imposé, (3 bis) donne alors:

$$MX = OM \tan A = L \tan A = KM \tan H = R \tan H, \text{ donc } R = L/\sin \varphi$$

L étant fixée on la choisit égale à la hauteur du style OB: L = OM = ℓ = OB,
donc le cercle de centre K a pour rayon:

$$R = \frac{\ell}{\sin\varphi} \qquad (16)$$

Pour obtenir graphiquement R connaissant *l* et φ on procède comme indiqué sur la figure 6.

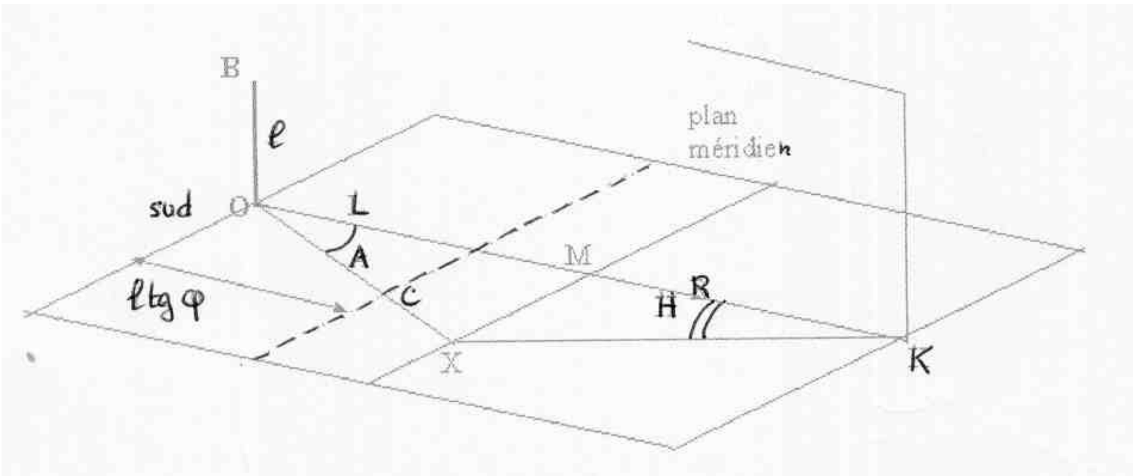


figure 5

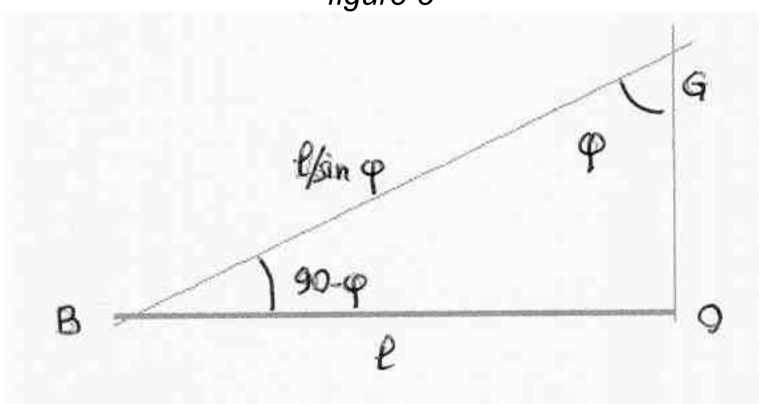


figure 6

a) tracer OB = ℓ
b) porter en O perpendiculaire OG
c) repérer en B l'angle 90 - φ
d) tracer droite BG = R = ℓ/sinφ
e) reporter BG sur MK depuis M
f) tracer cercle de centre K et de rayon R
g) diviser cercle en angles égaux H de 15° en 15° et joindre OX pour obtenir lignes horaires A

Trace de l'ombre du style: ℓ' = ℓ /tan h = OC = ℓ tan φ / cos A, donc C est sur une droite parallèle à la tangente en M au cercle de centre K et de rayon R, tel que

$$OC \cos A = \ell \tan \varphi$$

3-2 - Cadran horizontal style incliné de φ sur l'horizontale

On traduit géométriquement la relation (9): tan A' = tan H sin φ (voir figure 7):

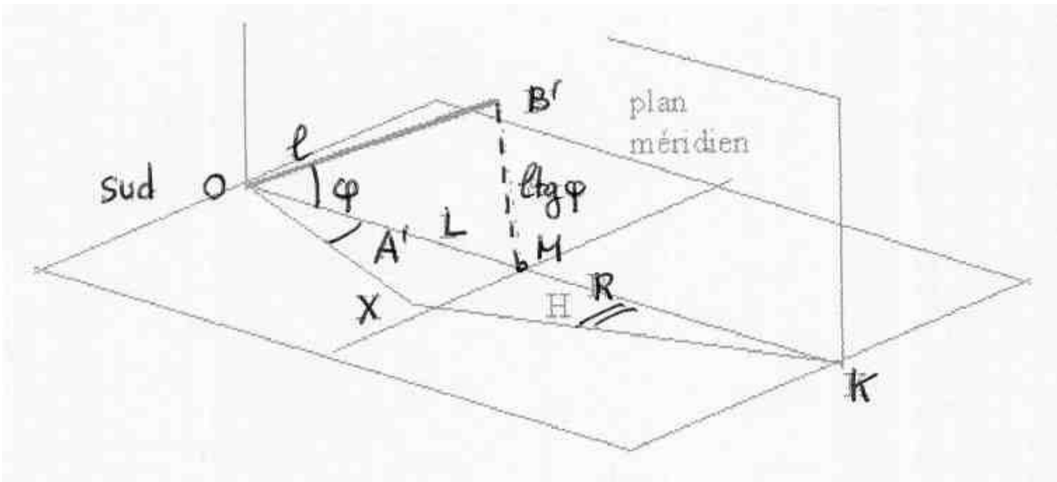


figure 7

R = MK
L = OM est fixée
MX = OM tan A' = L tan A' = KM tan H = R tan H
R = L tan A' / tan H
d'où R = L sin φ
L étant fixée on la choisit égale à L = OM = ℓ / cos φ , d'où:

$$R = B'M = \ell \tan \varphi$$

D'où le mode opératoire:
a) mener la perpendiculaire à OB' en B', cette perpendiculaire rencontre le plan horizontal en M
b) reporter au compas B'M en MK, tracer le cercle de centre K, de rayon B'M = MK
c) diviser ce cercle en angles égaux H = 15°, joindre les points X et tracer OX pour obtenir les A correspondants.

3-3 - Cadran vertical style incliné de 90 - φ sur la verticale

Traduction géométrique de la relation (11) : tan A'' = tan H cos φ (figure 8).

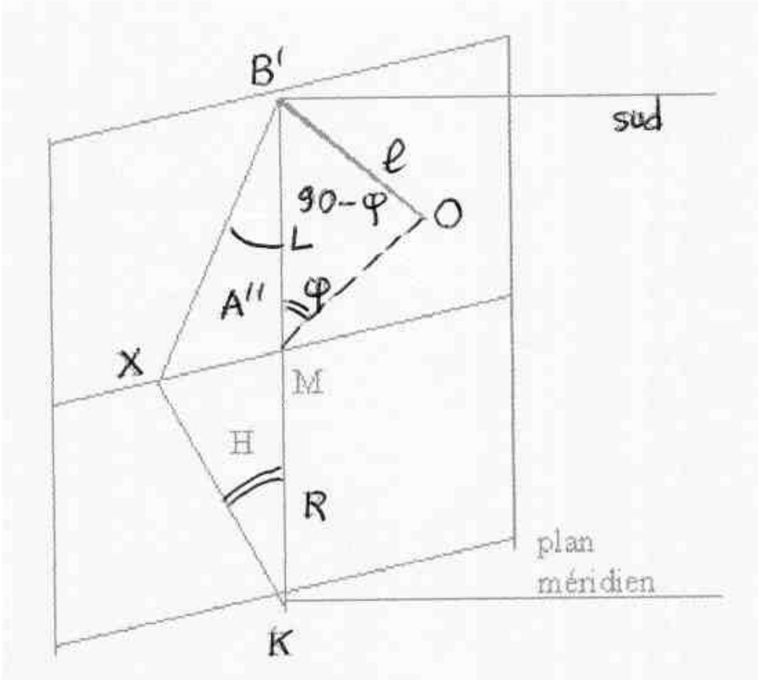


figure 8

B'M = L fixé
MK = R
XM = L tan A'' = R tan H
d'où: R = L cos φ . On choisit L = ℓ / sin φ donc: OB' = ℓ et:

$$R = \ell / \tan \varphi = OM$$

D'où le mode opératoire:
a) mener la perpendiculaire à OB' en O, elle coupe le plan vertical en M
b) reporter au compas OM en MK, tracer le cercle de centre K et de rayon R = OM = MK
c) diviser ce cercle en angles égaux H = 15°, joindre K à X et X à B' pour obtenir A''.

cadran solaire sur le mur au village de Saint-Guilhem le Désert (département de l'Hérault) (photo : F. Elie)

3-4 - Cadran équatorial

On a vu que les lignes horaires coïncident avec les angles horaires: $A_0 = H$. On trace alors directement celles-ci sur le plan équatorial en le divisant en angles égaux $H = 15°$ de centre B'' (figure 9).

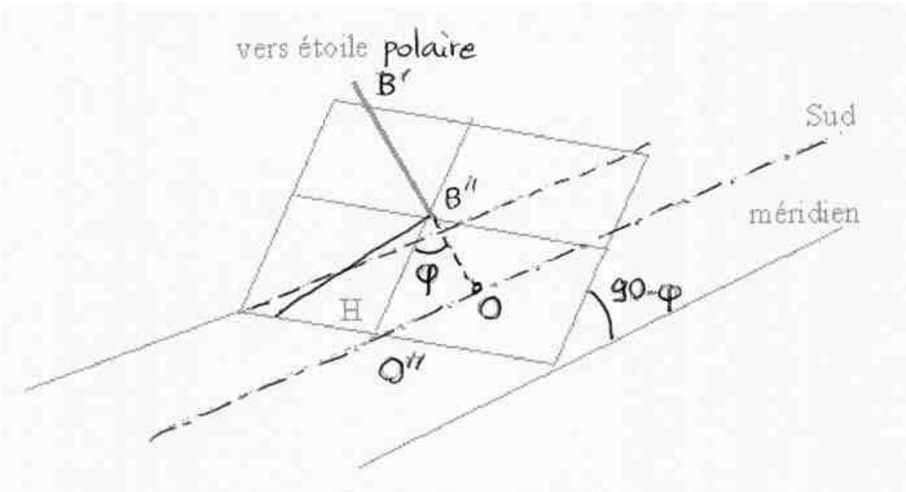


figure 9

Remarque :
Pour $\delta = 0°$ on a:
$B''H' = \ell \tan \varphi \, [1 + (\tan A \sin \varphi)^2]^{1/2} = \ell \tan \varphi \, [1 + \tan^2 H]^{1/2}$
Comme $A_0 = H$ alors $\tan A_0 = \tan H = \tan A \sin \varphi$
donc la projection sur B''O'' de l'ombre portée est donnée par:

$$B''H' \cos A_0 = \ell \tan \varphi \quad (17)$$

Annexe 1 - Calcul des lignes horaires et de l'ombre portée du style d'un cadran solaire dans les cas horizontal a style vertical, ou horizontal à style incliné, ou vertical à style incliné, ou équatorial, pour toute déclinaison du soleil

pour calculatrice programmable Sharp

```
10   PRINT "HORIZONTAL:":PRINT"STYLE DROIT R=1":PRINT"HORIZONTAL:":PRINT"STYLE INCL. R=2"
11   PRINT"VERTICAL R=3":PRINT"EQUAT. R=4"
12   INPUT"R=";R                                        ! choix du type de cadran
15   INPUT"LAT.=";P:U=SIN(P):V=COS(P)
20   INPUT"DECLIN=";D:T=TAN(D):W=COS(D):Y=SIN(D)
30   N=ACS(-SIN(D)/V):M=ACS(-T*U/V)/15:J=M:GOSUB 600    !calcul du coucher Ac, Hc
40   PRINT"COUCHER:":PRINT"AC=";N
50   PRINT"HC=";INT(J);"H";G;"MN"
60   FOR I=0 TO 8
70   H=15*I:IF H>15*M THEN GOTO 390
80   S=SIN(H):C=COS(H)
90   A=ATN(S/(C*U-T*V))                                 ! A=f(H) selon équation (3)
100  IF A<0 THEN GOTO 330
110  X=((W*S)^2+(C*U*W)^2+(V*Y)^2-2*V*U*Y*W*C)^0.5      ! ℓ'=ℓ/tan h selon équation (5)
120  X=ACS(X):L=1/TAN(X)
130  IF R=4 THEN GOTO 280
140  IF R=3 THEN GOTO 230
150  IF R=2 THEN GOTO 180
160  PRINT"H=";H/15:PRINT"A=";A:PRINT"L=";L             ! multiplier L ou Q par la longueur du style si celle-ci
                                                             n'est pas égale à l'unité
170  GOTO 370
180  B=ATN(SIN(A)*U/V/(COS(A)*U/V+1/L))                 ! calcul de A' selon équation (9)
190  IF B<0 THEN GOTO 340
```

```
200     Q=(L^2+(V/U)^2+2*L*V/U*COS(A))^0.5                  ! calcul de OC’ selon équation (10)
210     PRINT”H=‘’;H/15:PRINT”A=‘’;B:PRINT”L=‘’;Q            ! même remarque qu’en 160
220     GOTO 370
230     B=ATN(SIN(A)/(COS(A)*U/V+1/L))                      ! calcul de A” selon équation (11)
240     IF B<0 THEN GOTO 350
250     Q=(1+(SIN(A)/(COS(A)*U/V+1/L))^2)^0.5               ! calcul de B’H selon équation (12)
260     PRINT”H=‘’;H/15:PRINT”A=‘’;B:PRINT”L=‘’;Q            ! même remarque qu’en 160
270     GOTO 370
280     B=ATN(SIN(A)/(COS(A)*U+V/L))                        ! calcul de A0 selon équation (14)
290     IF B<0 THEN GOTO 360
300     Q=(U/V)*(1+(SIN(A)/(COS(A)*U+V/L))^2)^0.5           ! calcul de B”H’ selon équation (15)
310     PRINT”H=‘’;H/15:PRINT”A0=‘’;B:PRINT”L=‘’;Q           ! même remarque qu’en 160
320     GOTO 370
330     A=A+180:GOTO 110                                    ! changement de secteur du cercle trigonométrique
340     B=B+180:GOTO 200
350     B=B+180:GOTO 250
360     B=B+180:GOTO 300
370     NEXT I
380     GOTO 400
390     PRINT”H>HC”                                         ! dépassement de l’heure du coucher
400     INPUT”CORRECTION(O/N)”;R$                           ! correction pour déclinaison non nulle d’un cadran
                                                              horizontal à style vertical
410     IF R$=‘’N” THEN GOTO 490
420     FOR I=0 TO 6
430     H=15*I:S=SIN(H):C=COS(H)
440     Z=ACS(T*V/U*S^2+C*(1-(T*V/U*S)^2)^0.5)              ! correction selon équation (17)
445     J=Z/15:GOSUB 600
450     IF Z>=15*M THEN GOTO 480
460     PRINT”H0=‘’;H/15:PRINT”HVRAIE=‘’;INT(J);”H”;G;”MN”
470     NEXT I
475     GOTO 490
480     PRINT”HVRAIE>HC”
490     GOTO 10
500     END
600     G=INT((J-INT(J))*60):RETURN                         ! conversion de la partie décimale d’un angle horaire
                                                              en minutes
```

Si l’on tient compte de la loi de Cook pour calculer la déclinaison dans l’année, le programme ci-dessus est modifié comme suit:

```
17      INPUT”DECLIN.COOK(O/N)”;O$:IF O$=‘’O” THEN GOTO 25
20      ......................: GOTO 30
25      GOSUB 700:T=TAN(D):W=COS(D):Y=SIN(D)
700     PRINT”CALCUL D PAR COOK”
710     PRINT”DATE”:INPUT”JOUR”;JJ:INPUT”MOIS”;MM
720     IF MM=3 THEN GOTO 830
730     IF MM<3 THEN GOTO 780
770     N=-(12*31-(31*(MM-1)+JJ)+21+2*31):GOTO 860          ! on admet que tous les mois ont 31 jours
780     I=1
790     M=3-I
800     IF M=MM THEN GOTO 820                               !dates comprises entre 1/12 et 29/2
810     I=I+1:GOTO 790
820     N=-(21+31*I-JJ):GOTO 860
830     IF JJ<=21 THEN GOTO 850                             ! dates entre 21/3 et 31/3
840     N=-(11*31+21-JJ):GOTO 860
850     N=-(21-JJ)                                          ! dates entre 1/3 et 21/3
860     PRINT”N=‘’;N:D=23.5*SIN(N)                          ! formule de Cook approchée δ = 23,5 sin N
870     PRINT”D=‘’;D:RETURN
```

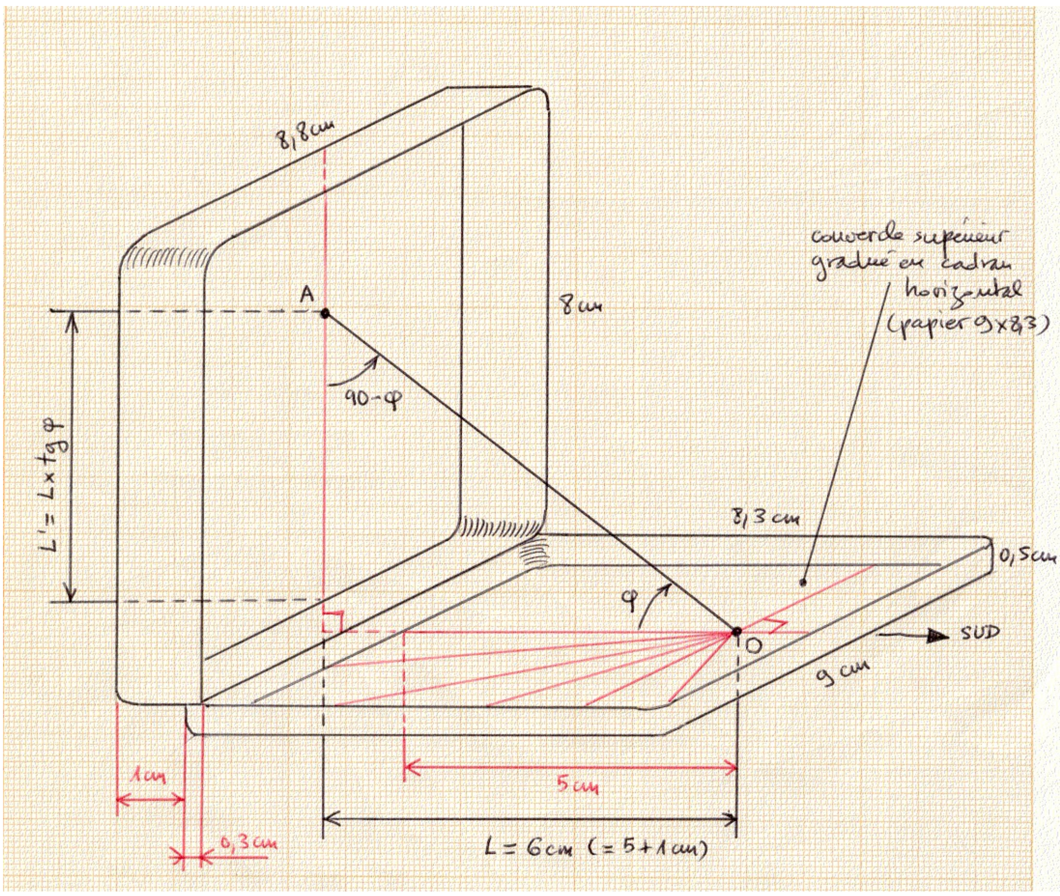
Annexe 2 - Calcul du jour de la semaine connaissant sa date

pour calculatrice programmable Sharp

```
1010    PRINT”JOUR DE SEMAINE”
1015    DIM D$(1)
1020    INPUT”JOUR”;JJ
1021    INPUT”MOIS”;MM
1022    INPUT”ANNEE”;AA
1023    A=1994:M=11:J=17                                    ! initialisation à un jour connu quelconque jeudi
                                                              17/11/1994
1024    D$(1)=‘’JEUDI”:N=0
1030    IF N=1 THEN GOTO 1040
1031    IF N=2 THEN GOTO 1041
```

```
1032    IF N=3 THEN GOTO 1042                                    ! si on change de jour initial
l'incrémentation est
1033    IF N=4 THEN GOTO 1043                                    décalée d'autant
1034    IF N=5 THEN GOTO 1044
1035    IF N=6 THEN GOTO 1045
1036    N=7:D$="JEUDI"
1037    GOTO 1050
1040    D$(1)="VENDREDI":GOTO 1050
1041    D$(1)="SAMEDI":GOTO 1050
1042    D$(1)="DIMANCHE":GOTO 1050
1043    D$(1)="LUNDI":GOTO 1050
1044    D$(1)="MARDI":GOTO 1050
1045    D$(1)="MERCREDI"
1050    R=(A-1994)/4-INT((A-1994)4)                   ! détermine si l'année est bissextile A=1994+4n
1051    IF R=0 THEN GOTO 1091
1055    IF M=2 THEN GOTO 1093                                 !année bissextile février (M=2) a 29 jours
1056    IF(M=4)OR(M=6)OR(M=9)OR(M=11) THEN GOTO 1059      ! les mois à 30j sont avril juin sept. novembre
1057    JM=31:GOTO 1060
1058    JM=29:GOTO 1060
1059    JM=30
1060    IF(J=JJ)AND(M=MM)AND(A=AA)THEN GOTO 1062
1061    GOTO 1070
1062    PRINT D$(1):GOTO 1095
1070    N=N+1:J=J+1
1071    IF N>7 THEN GOTO 1075                                    ! changement de semaine
1072    IF J>JM THEN GOTO 1080
1073    GOTO 1030
1075    N=1:GOTO 1072
1080    J=1:M=M+1                                                ! changement de mois
1081    IF M>12 THEN GOTO 1090                                  ! changement d'année
1082    GOTO 1030
1090    M=1:A=A+1:GOTO 1030
1091    IF M=2 THEN GOTO 1058
1092    GOTO 1056
1093    JM=28: GOTO 1060
1095    END
```

Annexe 3 - Construction d'un cadran solaire horizontal portatif à style incliné



Mode opératoire :
1 – Sur un papier millimétré 9 x 8,3 tracer les lignes horaires cadran horizontal style incliné de φ à l'aide du programme de calcul (cas R = 2)
2 – Découper le papier, le fixer au fond du couvercle supérieur
3 – Calculer L' = 6 x tan φ
4 – Repérer, au fond du couvercle inférieur, le point situé à la distance L' (point A) situé sur l'axe de symétrie
5 – Percer un trou en O et en A, faire passer par ces trous un fil qui servira de style, et le fixer de telle sorte que, ouverts à 90°, les couvercles tendent le fil