La Mesure du Temps

Unité de temps du Système International.

C'est la *seconde*, de symbole s.

Sa définition actuelle a été établie en 1967 par la 13ème Conférence des Poids et Mesures :

la seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation électromagnétique correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

Cette convention est apparue plus fiable et précise que celle qui l'avait précédée, qui était liée à la période de rotation de la Terre sur elle-même, et dont nous retrouverons plus loin la définition.

Néanmoins la « nouvelle seconde » a été choisie de façon à être égale, à la précision des mesures actuelles, à l'« ancienne seconde ».

Jour Solaire Vrai et Jour Solaire Moyen.

Le *jour solaire vrai* est le temps qui s'écoule entre deux passages consécutifs du centre du disque solaire dans le plan d'un même méridien terrestre.

La rotation correspondante de la Terre est appelée *révolution synodique*.

Ces jours solaires vrais sont inégaux pour plusieurs raisons : principalement à cause de la variation de la vitesse de la Terre sur son orbite (2ème loi de Képler) et de l'inclinaison de l'écliptique sur l'équateur.

La durée du jour solaire vrai varie entre 23 h 59 mn 39 s et 24 h 0 mn 30 s. Par exemple, le jour solaire vrai du 22 décembre est plus long que celui du 23 septembre de 50 s.

Le *jour solaire moyen* a une durée égale à la moyenne annuelle de la durée du jour solaire vrai.

Cette durée a été fixée à *24 heures* et a servi à définir la durée de la seconde :

1 seconde = 1/86400 jour solaire moyen.

Temps Solaire vrai $H_{/}$ et Temps Solaire Moyen H_m.

Les astronomes ont la fâcheuse habitude de donner le nom de *temps*, suivi d'une épithète (temps sidéral, temps solaire...) à des grandeurs essentiellement distinctes du temps t de la mécanique.

Ces grandeurs sont approximativement des fonctions linéaires du temps t dont les variations sont connues . Elles sont donc susceptibles de fournir le temps t proprement dit, mais en réalité, ce sont des *angles dièdres*.

Le *temps solaire vrai local* est, par définition, l'*angle horaire $H_{/}$* du centre du Soleil.

Lorsque le Soleil passe au méridien de l'observateur, on dit qu'il est midi vrai ; à cet instant l'angle horaire du Soleil est nul.

Le *temps solaire moyen* est l'*angle horaire H_m* d'un mobile fictif, appelé *Soleil moyen*, qui se déplacerait régulièrement sur l'équateur de manière que l'intervalle de temps qui s'écoulerait entre ses deux passages consécutifs en un même méridien soit égal à 24 h, durée du jour solaire moyen.

Equation du Temps :

1 - A cause de l’excentricité de l’orbite terrestre, le Soleil ne parcourt pas l’écliptique d’un mouvement uniforme. Il est tantôt en avance, tantôt en retard, par rapport à un mobile fictif qui se déplacerait sur l’écliptique avec une vitesse angulaire constante égale à la vitesse angulaire moyenne du Soleil (il ne faut pas confondre ce mobile fictif avec le Soleil moyen du paragraphe précédent, qui, lui, se déplace sur l’équateur).

La vitesse angulaire moyenne du Soleil, appelé *moyen mouvement du Soleil*, s’obtient en divisant l’angle décrit lors d’un tour complet de la Terre sur son orbite (soit 360°) par la durée de cette révolution (soit 365,25 jours environ). Elle vaut :

$$n = \frac{1296000''}{365,25} = 3548,2''/\text{jour} = 0°39'8,2''/\text{jour} = 0,9856°/\text{jour}$$

La distance angulaire entre le Soleil et le mobile fictif peut être représentée avec une bonne approximation par une fonction sinusoïdale du temps de période annuelle.

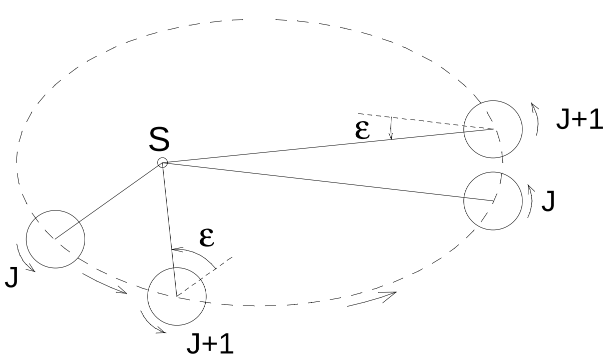
Cette inégalité périodique entre les mouvements du Soleil et du mobile fictif porte le nom d’*équation du centre C.*

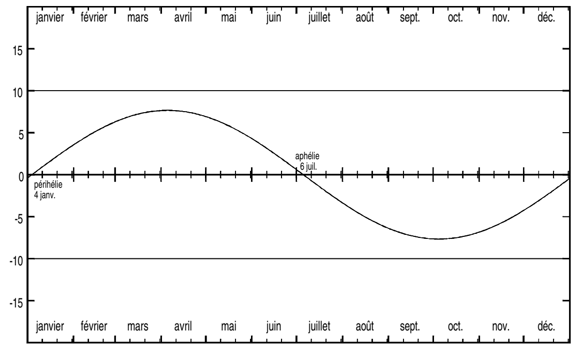
L’expression numérique de cette fonction peut être établie à partir des observations :
- aux moments des passages de la Terre au périhélie et à l’aphélie (c’est à dire aux environs du 2 janvier et du 5 juillet), l’écart entre le Soleil et le mobile fictif est nul,
- le 3 avril cet écart atteint son maximum, avec la valeur + 1° 55’ ; le Soleil se trouve donc en avance, ce jour-là, de 1° 55’ ; c’est approximativement son parcours en deux jours,
- le 1^{er} octobre le Soleil est en retard de deux jours environ, l’écart est alors égal à - 1° 55’.

Si nous comptons le temps à partir du 2 janvier, nous pouvons écrire :

$$\boxed{C = 115'.\ \sin nt}$$

avec : 115’ = 1° 55’, l’écart maximum observé,
et n = 0° 59’ 8’’/jour = 0,9856°/jour, vitesse moyenne du Soleil sur l’écliptique.





La longitude écliptique du Soleil (comptée à partir du point γ) vaut 282° au 2 janvier ; elle a donc pour expression, au temps t :

$$l_{\odot} = 282° + nt + C$$

2 - A cause le l'obliquité de l'écliptique sur l'équateur, l'ascension droite $\alpha_{/}$ du Soleil (repérée sur l'équateur) n'est pas égale à sa longitude écliptique $l_{/}$ (repérée sur l' écliptique).

L'ascension droite $\alpha_{/}$ du Soleil, sa longitude écliptique $l_{/}$ et l'obliquité ε de l'écliptique sont liées par la relation : (voir annexe)

$$\tan \alpha_{/} = \tan l_{/} \,.\, \cos \varepsilon$$

Par application de quelques relations trigonométriques, cette équation se transforme en :

$$\sin (\alpha_{/} - l_{/}) = - \tan^2 \varepsilon/2 \,.\, \sin (\alpha_{/} + l_{/})$$

Cette relation montre que $\sin (\alpha_{/} - l_{/})$ ne peut pas excéder $\tan^2 \varepsilon/2 = 0{,}0432$.

En conséquence l'angle $(\alpha_{/} - l_{/})$ a pour valeur maximale 2° 28' = 148'.

Il est donc légitime de confondre :

$$\sin (\alpha_{/} - l_{/}) \text{ avec } (\alpha_{/} - l_{/}) \qquad \text{et} \qquad (\alpha_{/} + l_{/}) \text{ avec } 2l_{/}$$

et d'écrire :

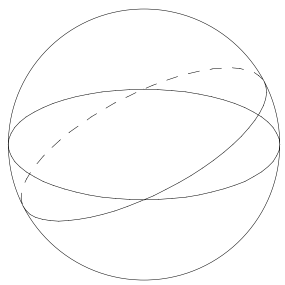
$$(\alpha_{/} + l_{/}) = - 148' \sin (2l_{/})$$

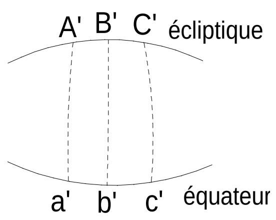
L'erreur entraînée par cette simplification ne dépasse jamais 3'.

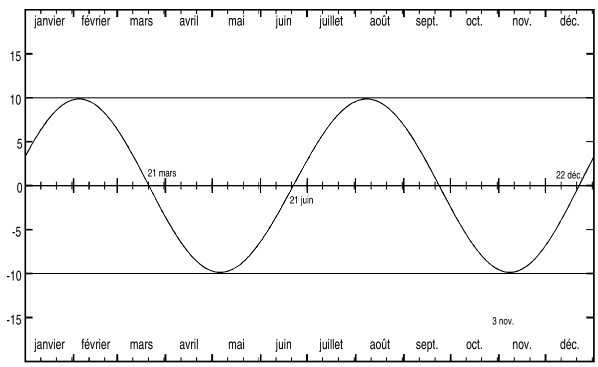
Cette seconde inégalité périodique du mouvement du Soleil a une période de 6 mois ; elle s'annule aux équinoxes et aux solstices .

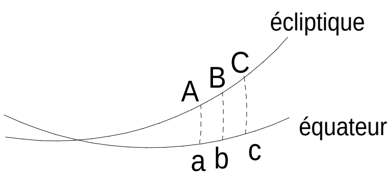
On l'appelle *réduction à l'équateur R*

$$\boxed{R = - 148'.\ \sin 2l_{/}}$$









L'ascension droite $\alpha_{/}$ du Soleil a pour expression :

$$\alpha_{/} = l_{/} + R = 282° + nt + C + R$$

L'*équation du temps* est la somme des deux inégalités précédentes qui affectent le mouvement du Soleil :

$$E = C + R$$

On désigne sous le nom de *Soleil moyen* le mobile fictif situé dans l'équateur qui aurait pour ascension droite :

$$\alpha_m = 282° + nt$$

L'équation du temps représente donc l'écart $\alpha_m - \alpha_{/}$ entre les ascensions droites du Soleil vrai et du Soleil moyen, écart qui est égal, au signe près, à celui de leurs angles horaires :

$$E = \alpha_{/} - \alpha_m = H_m - H_{/}$$

$$\Rightarrow \qquad \boxed{H_m = H_{/} + E}$$

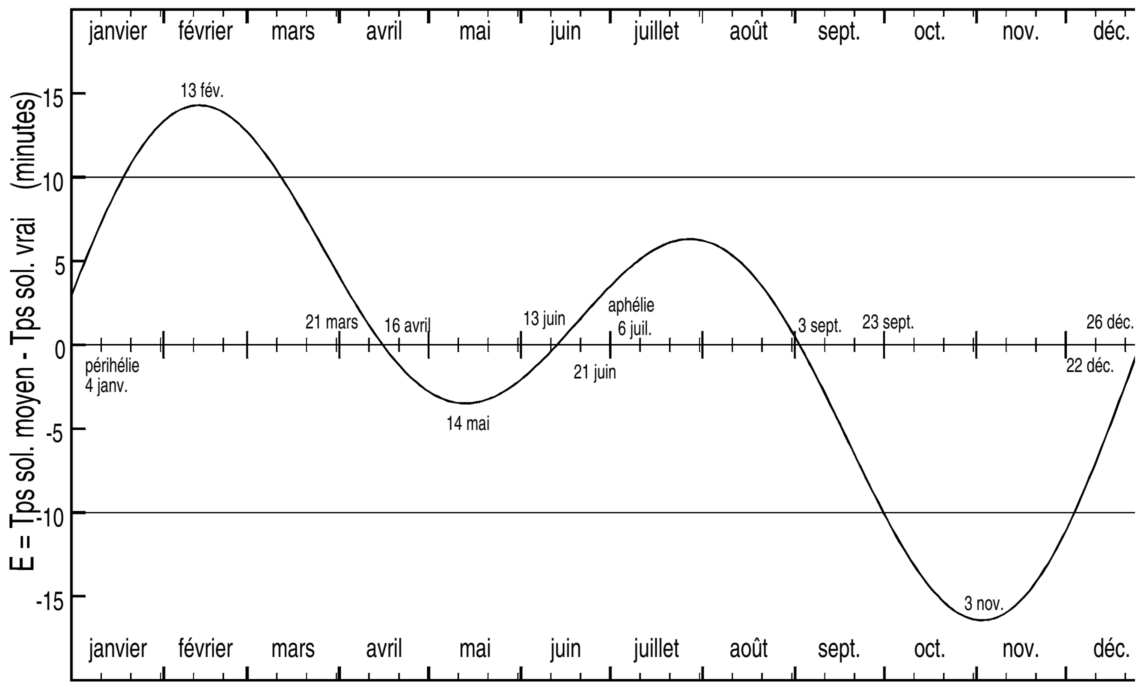
D'après les expressions de C et de R établies précédemment, l'équation du temps s'écrit :

$$\boxed{E_{(\text{en minutes d'angle})} = 115'.\ \sin 0{,}9856\ t - 148' \sin 2l_{/}}$$

Cet écart angulaire entraîne un décalage horaire entre le temps solaire vrai et le temps solaire moyen. Sachant que la Terre tourne sur elle-même de 1' en 4 secondes, ce décalage s'exprimera par :

$$\boxed{E_{(\text{en secondes de temps})} = 460 \sin 0{,}9856\ t - 592 \sin 2(282° + 0{,}9856\ t + 1{,}917 \sin 0{,}9856\ t)}$$

avec : 460s = 7 mn 40 s
592 s = 9 mn 52 s
Le temps t est compté, comme précédemment, en jours et à partir du 2 janvier.



Sur cette courbe, on peut observer les dates remarquables suivantes, avec un flottement de l'ordre de 1 jour.

• *Le 11 février*, le temps solaire moyen est en avance de + 14 mn 22 s sur le temps solaire vrai. E présente son maximum absolu ; sa variation pour un jour est nulle :
$\Delta E/\Delta t = 0$ ⇒ durée du jour solaire vrai = durée du jour solaire moyen

• Du *11 février au 15 mai*, E décroît : l'avance du temps solaire moyen diminue
⇒ durée du jour solaire vrai < durée du jour solaire moyen
La décroissance $\Delta E/\Delta t$ est maximale le 28 mars ; elle vaut alors - 18,4 s par jour.
Le *16 avril*, E = 0. Le Soleil vrai et le Soleil moyen passent ensemble en un même méridien ⇒ temps solaire vrai = temps solaire moyen.
A partir du 16 avril, le temps solaire moyen retarde par rapport au temps solaire vrai.

• *Le 15 mai*, E présente un minimum ; le retard du temps solaire moyen sur le temps solaire vrai est de - 3 mn 47 s.
$\Delta E/\Delta t = 0$ ⇒ durée du jour solaire vrai = durée du jour solaire moyen

• *Du 15 mai au 27 juillet*, E croît : le retard du temps solaire moyen diminue.
⇒ durée du jour solaire vrai > durée du jour solaire moyen
La croissance $\Delta E/\Delta t$ est maximale le 20 juin ; elle vaut alors + 13,0 s par jour.
Le*15 juin*, E = 0. Le Soleil vrai et le Soleil moyen passent ensemble en un même méridien ⇒ temps solaire vrai = temps solaire moyen.
A partir du 15 juin, le temps solaire moyen est en avance sur le temps solaire vrai.

• *Le 27 juillet*, E présente un maximum ; l'avance du temps solaire moyen sur le temps solaire vrai est de + 6 mn 23 s.
$\Delta E/\Delta t = 0$ ⇒ durée du jour solaire vrai = durée du jour solaire moyen

• Du *27juillet au 4 novembre*, E décroît : l'avance du temps solaire moyen diminue
⇒ durée du jour solaire vrai < durée du jour solaire moyen
La décroissance $\Delta E/\Delta t$ est maximale le 17 septembre ; elle vaut alors - 21,4 s par jour.
Le *2 septembre*, E = 0. Le Soleil vrai et le Soleil moyen passent ensemble en un même méridien ⇒ temps solaire vrai = temps solaire moyen.
A partir du 2 septembre, le temps solaire moyen retarde par rapport au temps solaire vrai.

• *Le 4 novembre*, E présente son minimum absolu. Le retard du temps solaire moyen sur le temps solaire vrai est de - 16 mn 23 s.
$\Delta E/\Delta t = 0$ ⇒ durée du jour solaire vrai = durée du jour solaire moyen

• *Du 4 novembre au 11 février*, E croît : le retard du temps solaire moyen diminue
⇒ durée du jour solaire vrai > durée du jour solaire moyen
La croissance $\Delta E/\Delta t$ est maximale le 23 décembre ; elle vaut alors + 29,9 s par jour.
Le *25 décembre*, E = 0. Le Soleil vrai et le Soleil moyen passent ensemble en un même méridien ⇒ temps solaire vrai = temps solaire moyen.
A partir du 25 décembre, le temps solaire moyen est en avance sur le temps solaire vrai.

Le Temps des Cadrans Solaires $T_{/}$

On l'appelle couramment l'*heure solaire locale.*

Les lignes horaires d'un cadran permettent de mesurer l'angle horaire du Soleil vrai à chaque instant.

Par raison de commodité pour la vie courante, les cadrans solaires indiquent midi c'est à dire 12 h, quand le Soleil passe au méridien et que son angle horaire est nul. Donc :

$$\boxed{T_{/} = H_{/} + 12\text{ h}}$$

C'est un *temps local qui dépend de la longitude du lieu.*

La différence de longitude λ de deux lieux est l'angle de leurs méridiens astronomiques.

On a adopté comme méridien origine celui de l'observatoire de Greenwich : c'est le méridien international.

Les *longitudes sont comptées positivement vers l'Ouest, négativement vers l'Est.*

Les astronomes les expriment en heures ; les géographes et les marins en degrés, avec la correspondance :

15° pour 1 heure et 1° pour 4 mn .

Appelons H_G et H_L les deux valeurs de l'angle horaire d'un même astre observé à un même instant depuis respectivement le lieu G situé dans le méridien origine et le lieu L de longitude λ,

$$H_L = H_G - \lambda$$

D'une manière générale, les angles horaires d'un même astre, en deux lieux, diffèrent entre eux de la différence des longitudes de ces lieux.

L'indication d'un cadran solaire placé en un lieu de longitude λ, est liée à celle d'un cadran solaire placé à Greenwich par la relation suivante :

$$\boxed{T_{/\ \text{local}} = T_{/\ \text{Greenwich}} - \lambda_{\text{exprimée en heures}}}$$

Temps Civil Local T_C.

Le jour civil, d'une durée de 24 h commence à minuit et se termine au minuit suivant quand le Soleil moyen passe au méridien inférieur.

Le *temps civil local* correspond donc au temps solaire moyen augmenté de 12 h :

$$\boxed{T_C = H_m + 12\text{ h}}$$

Puisque $H_m = H_{/} + E \quad \Rightarrow \quad H_m + 12\text{ h} = H_{/} + 12\text{ h} + E$ et :

$$\boxed{T_C = T_{/} + E}$$

Temps Universel T.U.

C'est le temps civil du méridien de Greenwich :

$$\boxed{\text{T.U.} = T_{/\ \text{Greenwich}} + E}$$

Temps Légal en France .

$$\boxed{T_{\text{légal}} = \text{T.U.} + 1 \text{ h (ou 2 h en été)}}$$

C'est l'*heure des montres et des horloges* en France.

Relation entre Temps Légal et Temps des Cadrans Solaires.

Nous avons vu que : $T_{/\ \text{local}} = T_{/\ \text{Greenwich}} - \lambda_{\text{exprimée en heures}}$

$$\Rightarrow \quad T_{/\ \text{Greenwich}} = T_{/\ \text{local}} + \lambda_{\text{exprimée en heures}}$$

et :

$$\boxed{T_{\text{légal}} = T_{/\ \text{local}} + E + \lambda_{\text{exprimée en heures}} + 1 \text{ (ou2) h}}$$

avec $T_{/\ \text{local}}$: l'heure solaire locale donnée par un cadran solaire,
E : la correction de l'équation du temps,
λ : la longitude du lieu comptée positivement vers l'Ouest, négativement vers l'Est.

Quelques durées astronomiques remarquables.

Le jour stellaire est le temps qui s'écoule entre deux passages consécutifs d'une même étoile dans le plan d'un même méridien terrestre : ce temps correspond, dans un repère géocentrique, pratiquement galiléen, à une révolution complète de la Terre autour de son axe et que l'on appelle *révolution sidérale*.

Le jour stellaire dure 23 h 56 mn 4,09055 s.

Le jour sidéral est la période de retour du point vernal γ à un même méridien.

Le point γ se déplaçant dans les sens rétrograde (précession), le jour sidéral est un peu plus court que le jour stellaire. La différence est de 0,08 s.

L'année sidérale est la période orbitale de la Terre autour du Soleil, dans le repère de Copernic. Elle vaut 365,25636556 jours ou $3{,}1558149984.10^7$ s.

L'année tropique est le temps écoulé entre deux passages consécutifs du Soleil au point vernal γ. Elle durait 365,24219879 jours en 1900. Elle diminue de 0,53 s par siècle.

L'année tropique est plus courte que l'année sidérale à cause de la précession des équinoxes.

L'année civile commence de 1er janvier à 0 h et se termine le 31 décembre à 24 h.

Les années civiles ordinaires comportent 365 jours.

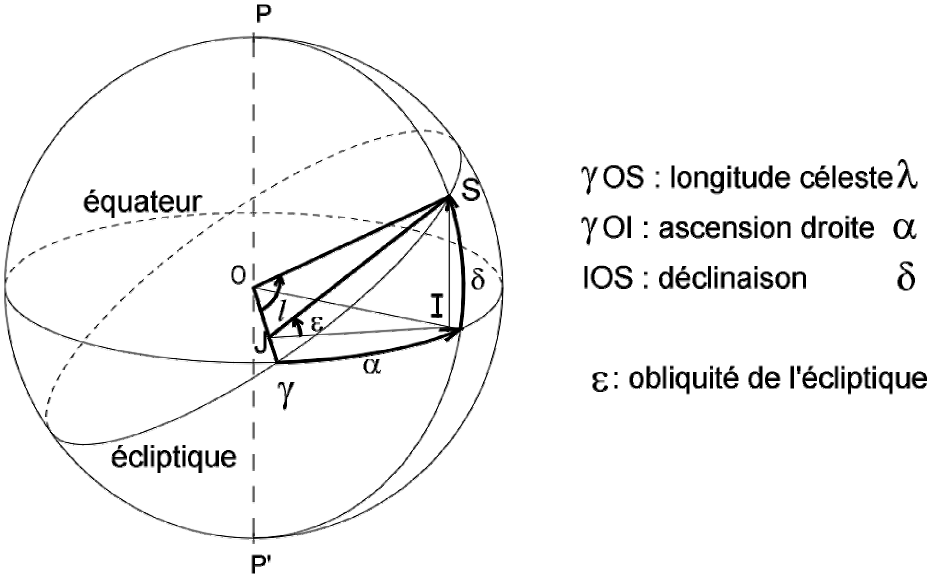
Tous les quatre ans, l'année civile est bissextile et comporte 366 jours. Toutes les années dont l'expression numérale est divisible par 4 est bissextile, mais les années séculaires ne le sont que si leur millésime est divisible par 400.

Annexe : **EQUATION DU TEMPS** (valeur moyenne à 0 h T.U.)

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	
Jours	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s	Jours
1	+ 3 16	+ 13 33	+ 12 34	+ 4 09	- 2 51	- 2 25	+ 3 34	+ 6 18	+ 0 15	-10 03	-16 21	-11 15	1
2	3 44	13 41	12 22	3 51	2 59	2 16	3 46	6 15	- 0 04	10 23	16 23	10 53	2
3	4 12	13 48	12 10	3 33	3 06	2 07	3 57	6 10	0 24	10 42	16 24	10 30	3
4	4 40	13 55	11 58	3 15	3 12	1 57	4 08	6 06	0 43	11 00	16 24	10 06	4
5	5 07	14 00	11 44	2 57	3 18	1 47	4 19	6 00	1 03	11 19	16 24	9 42	5
6	+ 5 34	+14 05	+11 31	+ 2 40	- 3 23	- 1 36	+ 4 30	+ 5 54	- 1 23	-11 37	-16 22	- 9 17	6
7	6 00	14 09	11 17	2 22	3 28	1 26	4 40	5 48	1 43	11 55	16 20	8 52	7
8	6 26	14 12	11 02	2 05	3 33	1 15	4 49	5 41	2 03	12 12	16 17	8 26	8
9	6 51	14 15	10 48	1 49	3 36	1 03	4 59	5 33	2 24	12 29	16 13	8 00	9
10	7 16	14 17	10 32	1 32	3 39	0 52	5 08	5 25	2 45	12 45	16 08	7 33	10
11	+ 7 40	+14 17	+ 10 17	+ 1 16	- 3 41	- 0 40	+ 5 16	+ 5 16	- 3 05	-13 01	-16 02	-7 06	11
12	8 04	14 18	10 01	1 00	3 43	0 28	5 25	5 07	3 26	13 17	15 55	6 38	12
13	8 27	14 17	9 45	0 44	3 45	0 15	5 32	4 57	3 47	13 32	15 48	6 10	13
14	8 50	14 16	9 29	0 29	3 45	- 0 03	5 40	4 46	4 08	13 46	15 39	5 42	14
15	9 12	14 14	9 12	+ 0 13	3 45	+ 0 10	5 46	4 35	4 30	14 00	15 30	5 13	15
16	+ 9 33	+14 11	+ 8 55	- 0 01	- 3 45	+ 0 23	+ 5 53	+ 4 24	- 4 51	-14 13	-15 20	- 4 44	16
17	9 54	14 07	8 38	0 16	3 44	0 36	5 59	4 12	5 12	14 26	15 09	4 15	17
18	10 14	14 03	8 21	0 29	3 42	0 49	6 04	3 59	5 33	14 38	14 58	3 46	18
19	10 33	13 58	8 03	0 43	3 40	1 02	6 09	3 46	5 55	14 50	14 45	3 16	19
20	10 51	13 53	7 46	0 56	3 37	1 15	6 13	3 33	6 16	15 01	14 32	2 47	20
21	+ 11 09	+13 46	+ 7 28	- 1 09	- 3 34	+ 1 28	+ 6 17	+ 3 19	- 6 37	-15 12	-14 18	-2 17	21
22	11 26	13 39	7 10	1 21	3 30	1 41	6 20	3 04	6 58	15 21	14 03	1 47	22
23	11 43	13 32	6 52	1 33	3 26	1 54	6 23	2 49	7 19	15 31	13 47	1 17	23
24	11 58	13 24	6 34	1 44	3 21	2 07	6 24	2 34	7 40	15 39	13 31	0 47	24
25	12 13	13 15	6 16	1 55	3 15	2 20	6 26	2 18	8 01	15 47	13 14	- 0 18	25
26	+ 12 27	+13 06	+ 5 58	- 2 06	- 3 10	+ 2 33	+ 6 27	+ 2 01	- 8 22	-15 54	-12 56	+ 0 12	26
27	12 40	12 56	5 40	2 16	3 03	2 46	6 27	1 46	8 43	16 00	12 37	0 42	27
28	12 52	12 45	5 21	2 25	2 56	2 58	6 26	1 27	9 03	16 06	12 17	1 11	28
29	13 04		5 03	2 34	2 49	3 11	6 25	1 09	9 23	16 11	11 57	1 40	29
30	13 14		4 45	2 43	2 41	3 23	6 23	0 51	9 43	16 15	11 36	2 10	30
31	+13 24		+ 4 27		- 2 33		+ 6 21	+ 0 33		-16 19		+ 2 39	31

Annexe

Expression de la différence entre longitude écliptique et ascension droite du Soleil



$$\tan \alpha_\Theta = \frac{JI}{OJ} = \frac{JS.\ \cos \varepsilon}{OJ} \qquad \text{soit :} \quad \tan \alpha_\Theta = \tan l_\Theta\ .\ \cos \varepsilon$$

Cette relation peut s'écrire :

$$\tan \alpha_\Theta = \tan l_\Theta \ \frac{1 - \tan^2 \frac{\varepsilon}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\varepsilon}{2}}$$

En développant et en ordonnant :

$$\tan \alpha_\Theta - \tan l_\Theta = - \tan^2 \frac{\varepsilon}{2} \ (\tan \alpha_\Theta + \tan l_\Theta)$$

ou encore :

$$\frac{\sin \alpha_\Theta \cos l_\Theta - \cos \alpha_\Theta \sin l_\Theta}{\cos \alpha_\Theta \cos l_\Theta} = - \tan^2 \frac{\varepsilon}{2} . \frac{\sin \alpha_\Theta \cos l_\Theta + \cos \alpha_\Theta \sin l_\Theta}{\cos \alpha_\Theta \cos l_\Theta}$$

soit, après simplification :

$$\sin (\alpha_\Theta - l_\Theta) = - \tan^2 \frac{\varepsilon}{2} \sin (\alpha_\Theta + l_\Theta) .$$