



Astrolabe de Séville - 1563

# **L'Atlantique avec une montre et un rapporteur**

Ou comment faire le point en haute mer avec presque rien. R. Kirsch 2013 V5

## Sommaire

Introduction .....	0
Astrolabe maison .....	0
Observation de la hauteur de l'étoile polaire .....	1
Observation de la a hauteur du soleil.....	1
La latitude .....	1
Par l'étoile polaire .....	1
Par le soleil .....	1
La longitude .....	2
Le problème.....	2
En mer .....	3
La montre .....	3
Le passage du soleil au méridien.....	3
L'équation du temps .....	3
Analème (analemme).....	4
Détermination de la longitude	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Résultats.....	6
Annexes .....	7
Utilisation de l'astrolabe.....	7
Bâton de Jacob .....	7
Un amusement, mesurer l'équation du temps .....	9
Références .....	10

## Introduction

---

Une traversée de l'atlantique à la voile avec un couple d'amis à la sortie de l'hiver à bord d'un catamaran de 17 m entre les Canaries et les Antilles m'a donné l'occasion de relever le défi de la navigation à l'ancienne, sans électronique, presque comme au temps de Christophe Colomb. Nous étions deux, mon ami et moi, à nous partager les quarts de nuit, la navigation et la marche du bateau pendant 19 jours en février et mars 2013. Plusieurs anticyclones se succédant dans le milieu de l'océan, nous avons été incités à naviguer très au sud en passant entre les îles du Cap Vert et jusque dans les 11° de latitude au nord de l'Amérique du Sud. Nous avons finalement mis pied à terre à Pointe à Pitre après avoir longé par l'est le chapelet d'îles des Caraïbes de la Barbade à la Guadeloupe.

Cette expérience de positionnement minimaliste a été d'autant plus intéressante que nous connaissions à tout moment notre position exacte grâce au GPS et à l'électronique moderne de navigation associée qui nous ont permis de faire les comparaisons en temps réel entre la position ainsi observée et la position exacte donnée par le GPS à  $\pm 5$  mètres. J'en donne ici quelques explications et présente les résultats dont la précision de positionnement se situe, selon la méthode utilisée, entre  $1/4^\circ$  (15' d'arc  $\approx 27$  km) et  $1,5^\circ$  (83' d'arc  $\approx 150$  km). Les résultats les meilleurs concernent bien sûr la latitude et les moins bons la longitude. Cependant, quand on pense que Christophe Colomb a pu faire des erreurs de longitude de 2000 km, on ne peut ni se plaindre ni le blâmer car il n'avait pas nos montres !

Ce texte est susceptible d'intéresser les navigateurs qui se sont frottés à la question du positionnement en haute mer. Certaines explications (trop) détaillées intéresseront peut-être quelque astronome amateur ou autre curieux ? Peut-être. C'est une bouteille à la mer, dont on peut ignorer certains paragraphes ; merci à Gilbert, béotien en la matière mais combien perspicace, pour la relecture plus qu'attentive et ses judicieux commentaires.

## Astrolabe maison

---

La facilité stupéfiante avec laquelle on peut connaître aujourd'hui à tout instant, en tout lieu, sa position sur le globe terrestre grâce au GPS, conjuguée avec l'utilisation d'une tablette et d'un logiciel affichant une carte à l'échelle désirée, sur laquelle apparaît la position du bateau, son cap et sa vitesse ainsi que la route sur le fond, fait penser que la navigation est devenue un jeu d'enfant.

Ayant transpiré dans un passé pas si lointain avec des tables de logarithmes et des pages de calculs pour exploiter les relevés effectués au sextant et tracer la position du navire sur une carte, j'ai eu une idée saugrenue la semaine précédant mon embarquement. Je m'étais mis en tête de fabriquer à la hâte un astrolabe en contreplaqué équipé d'un rapporteur sur une de ses faces et d'une alidade en son centre équipée de deux équerres fendues (Photo 1). Le rapporteur est une facilité pour ne pas avoir à graver à la main les 360° du cercle ! Je voulais constater en situation réelle de navigation, avec quelle précision je pourrai me localiser avec un tel matériel minimaliste.

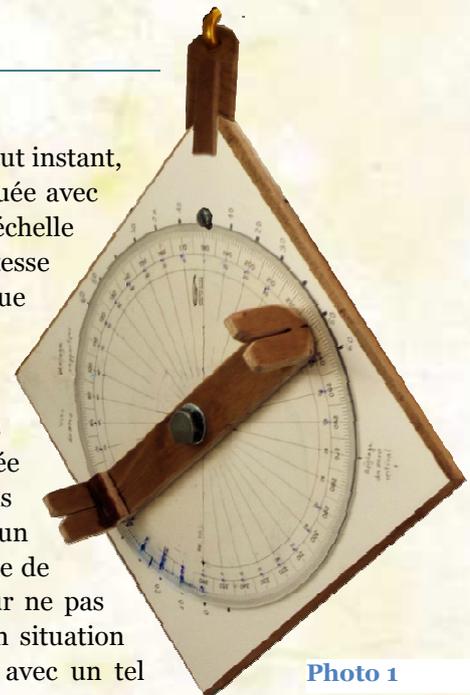


Photo 1

Ce système suspendu comme un fil à plomb se positionne selon la verticale du lieu et définit à 90° un plan horizontal de référence sans avoir à viser l'horizon. Cela fonctionne un peu comme un sextant de navigation aérienne qui définit d'une manière semblable un horizon artificiel.

## Observation de la hauteur de l'étoile polaire

Il s'agit de la mesure de l'angle entre le plan horizontal du lieu et la direction de l'astre. Pour mesurer avec cet instrument, dans l'hémisphère nord, la hauteur de l'étoile polaire il n'est pas nécessaire de voir l'horizon ; cela peut donc se faire toute la nuit et pas seulement au crépuscule ou en fin de nuit. On procède par une visée le long des deux fentes en direction de l'astre, l'œil étant placé sous la fente inférieure et la lecture de la position angulaire de l'alidade fournit la hauteur de l'étoile. Tout cela se fait évidemment par rotations successives de l'alidade et nécessite un peu d'entraînement pour l'amener dans la bonne position.

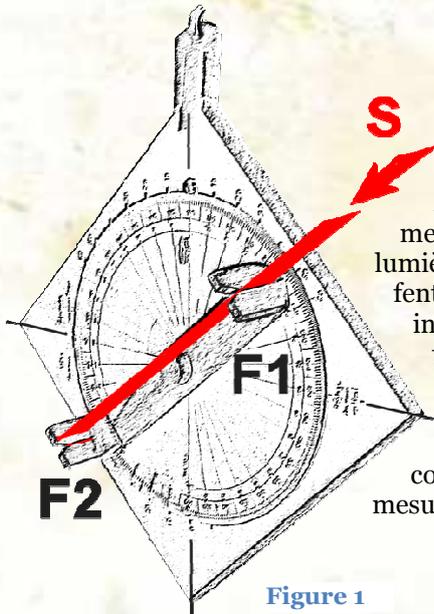


Figure 1

## S Observation de la hauteur du soleil

Avec le soleil dans le dos, évitant ainsi de viser le soleil à l'œil nu, la mesure de la hauteur du soleil (S) se fait, en regardant le passage de la lumière à travers la fente supérieure F1 et en observant sa projection sur la fente F2 (Fig. 1). Pour estimer à un instant donné sa hauteur avec ce simple instrument, il suffit d'amener le rai de lumière (rouge sur le schéma) traversant la première fente F1 sur la deuxième fente F2 en tournant progressivement l'alidade jusqu'à la coïncidence avec F2. Il suffit alors de lire son angle par rapport au repère horizontal pour connaître la hauteur angulaire du soleil à ce moment et de noter l'heure correspondante. Comme nous le montrerons plus loin, l'heure exacte des mesures solaires est effectivement une information très importante.

## La latitude

Comme vous le savez sans doute, la mesure de la hauteur de l'étoile polaire dans l'hémisphère nord ou de la hauteur du soleil à l'instant de son passage par le méridien du lieu quand sa hauteur est **maximale**<sup>1</sup>, permettent de connaître très simplement la latitude du lieu d'observation.

### Par l'étoile polaire

Lorsqu'elle est visible, l'étoile polaire est très simple à exploiter car la hauteur de l'étoile au-dessus du plan horizontal est tout simplement **égale**<sup>2</sup> à la latitude du lieu d'observation. On lit donc l'angle sur le rapporteur lorsqu'on a visé l'étoile. Avec cet astrolabe rudimentaire on augmente sensiblement la précision de la mesure en faisant rapidement plusieurs mesures successives après avoir déréglé l'alidade entre chacune d'elles et en calculant leur valeur moyenne que l'on considère comme la hauteur mesurée.

### Par le soleil

Le soleil se fait plus tricheur car il faut avoir noté au préalable dans ses tablettes les variations de hauteur saisonnières du soleil au-dessus du plan de l'équateur pour la période de navigation concernée et en tenir compte pour faire une correction de hauteur. Tout un chacun a constaté dans l'hémisphère nord qu'en hiver le soleil reste bas sur l'horizon et qu'en été il est très haut. Les valeurs remarquables de la correction sont :  $0^\circ$  aux équinoxes lorsqu'il passe par le plan de l'équateur terrestre,  $+23,5^\circ$  (vers le nord) au solstice d'été et  $-23,5^\circ$  (vers le sud) au solstice d'hiver. Il y a trois millénaires déjà nos ancêtres nous parlent de cela dans leurs tablettes et ils avaient sans doute noté cela depuis bien plus longtemps.

1 •

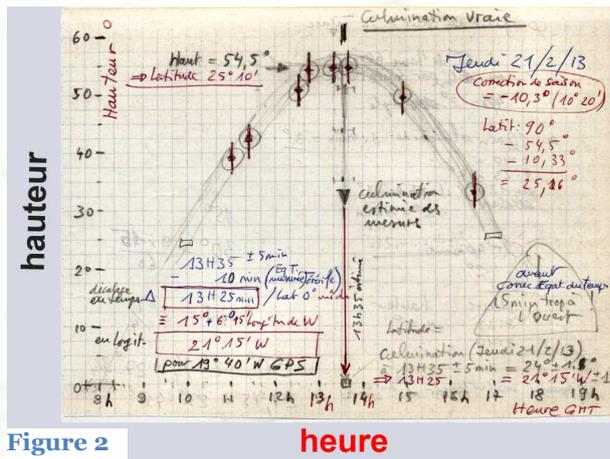


Figure 2 hauteur

d'axes orthogonaux, sur une courbe d'allure parabolique. En traçant à main levée une parabole passant au mieux par les hauteurs mesurées à  $1^\circ$  près on peut faire une bonne estimation de la hauteur de culmination du soleil à  $54,5^\circ$  ce jour là (Fig. 2).

### Exploitation des mesures de hauteurs du soleil :

En fait la latitude ( $L$ ) est égale à l'angle entre le soleil et le zénith à l'équinoxe (Fig.3), et la hauteur observée à midi est son complément à  $90^\circ$ . Comme nous ne sommes pas habituellement à une équinoxe, nous devons appliquer une correction de hauteur (déclinaison pour ce jour-là  $-10,3^\circ$ ). D'où la latitude mesurée le 21 février à midi solaire :  $90^\circ - 54,5^\circ - 10,3^\circ = 25,2^\circ \pm 1^\circ$  pour une latitude GPS de  $24,5^\circ$  à la même heure, soit une erreur de  $7'$  d'arc =  $13 \text{ km}$ . En plein océan, avec cet astrolabe, ma montre, et une table de correction, c'est honorable. Sur le rapporteur de l'astrolabe je peux d'ailleurs lire directement l'angle du soleil avec le zénith.

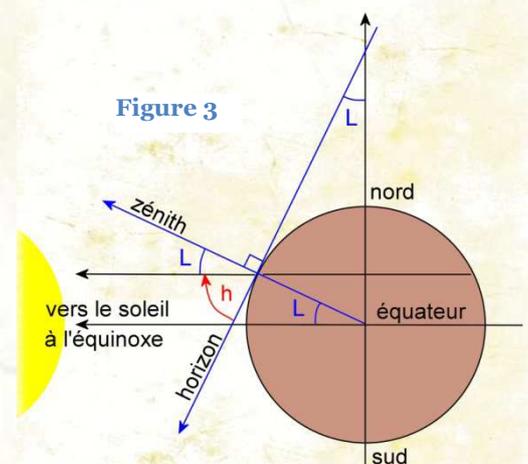


Figure 3

## La longitude

### Le problème

Les premières tentatives de détermination précise de la différence de longitude entre deux lieux à terre remontent à **Galilée**<sup>3</sup>. Elles exploitent toujours l'observation d'un évènement astronomique, liée à la rotation de la terre et l'heure de son occurrence. Pour connaître l'écart de longitude en deux lieux différents, on mesure un écart de temps que l'on converti ensuite très facilement en écart de longitude ; cela nécessite donc la connaissance précise du temps. On a le choix entre deux méthodes pour obtenir cet écart en temps.

- 1 Soit 1 évènement astronomique unique + 2 horloges locales indiquant des heures différentes : Il s'agit de dater au même instant par deux observateurs distants, utilisant deux horloges aux heures locales, l'occurrence d'un évènement unique visible des deux lieux. Mise en œuvre lourde, possible pour des observatoires à terre et méthode utilisée par Galilée qui utilisait l'occultation des satellites de Jupiter comme top de synchronisation pour noter au même instant l'heure locale en deux lieux dont il cherchait à connaître la différence de longitude.
- 2 Soit 1 horloge unique + 2 occurrences locales du même évènement à des moments différents : Il s'agit alors de dater à l'aide d'une horloge unique, montres à l'heure UTC par exemple, un évènement local, culmination, lever ou coucher d'un même astre, vu de deux lieux différents à des instants différents. Matériel léger, utilisable en mer, mais nécessite le transport de l'heure par des chronomètres fiables !

## En mer

La mesure correcte de la longitude en mer, doit pouvoir se faire en tout lieu et le plus fréquemment possible. Si la question était posée et la solution imaginée depuis l'Antiquité, il a fallu attendre la deuxième moitié du 18<sup>e</sup> siècle, la catastrophe de la flotte britannique, l'inventivité de **John Harrison** et le « **Longitude Act**<sup>4</sup> » britannique pour que l'horlogerie fournisse des chronomètres assez précis, fiables et transportables, permettant, après des jours et des semaines de navigation, la mesure précise de la longitude en mer par la méthode dite du « transport de chronomètre ».

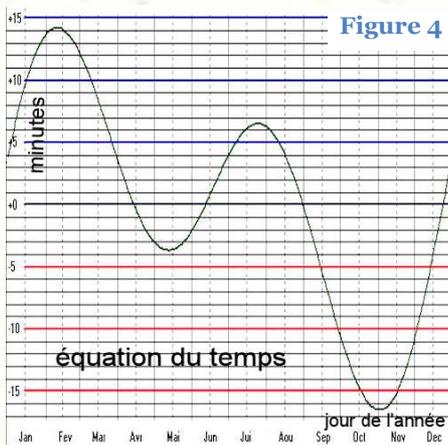
## La montre

Il est donc absolument nécessaire de disposer de l'heure exacte (référence de temps). De nos jours n'importe quelle montre à quartz est capable de conserver l'heure pendant plus d'un mois avec une précision suffisante. On la met à l'heure du lieu de départ ou à l'heure UTC sans la mettre à jour du fuseau horaire local si celui-ci change, pour disposer d'une heure de référence. De toute façon de nombreux instruments de bord ou votre téléphone mobile donnent aussi l'heure UTC avec une très grande précision. Aujourd'hui conserver le **temps** ne pose plus aucun problème.

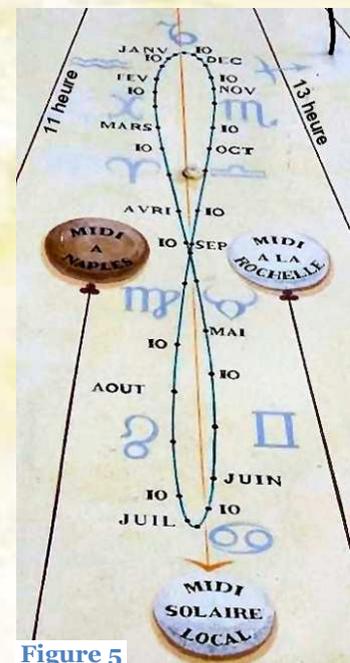
## Le passage du soleil au méridien

De la *figure 2* (page 2) de mon carnet d'observations montrant la courbe de hauteur du soleil du 21 février 2013 nous avons estimé l'instant du passage au méridien en traçant l'axe de symétrie de la courbe. On aurait pu penser que le décalage en temps de *1h35* du midi local peut directement être converti en décalage de longitude entre Greenwich (méridien de référence UTC) et le lieu d'observation par une règle de trois ; le soleil parcourant  $360^\circ$  de longitude par jour de  $24\text{ h} = 15^\circ$  à l'heure =  $1^\circ$  toutes les *4 minutes*. Or dans l'exploitation des mesures de hauteur du soleil j'ai appliqué la correction de hauteur de  $10,3^\circ$  pour ce jour-là car le soleil est un peu capricieux !

## L'équation du temps ou les caprices du soleil



Depuis l'apparition des premiers chronomètres au 18<sup>e</sup> siècle, on a pu remarquer en observant les cadrans solaires que le soleil pouvait avoir un quart d'heure d'avance ou du retard sur l'heure de nos montres ! Le tracé en « 8 » du cadran solaire donné en exemple et photographié à Sallanche (*fig.5*) est un analeme. Il montre tout au long de l'année les positions de l'ombre du style du cadran à midi sur une horloge à l'heure locale. On s'aperçoit qu'en parcourant les mois,



les variations verticales représentent les corrections de hauteur saisonnières du soleil (extrema de hauteur aux solstices des 21 juin et 21 décembre) et les écarts horizontaux représentent soit un retard du soleil à gauche du côté de 11h, soit une avance vers la droite en direction de 13h. Ce sont ces écarts de temps, d'environ *30 minutes* d'amplitude totale, observés entre la marche réelle du soleil et la marche régulière des montres que l'on exprime par la courbe de correction appelée encore aujourd'hui « équation du temps » (*fig.4*). Elle fait partie des notions fondamentales de l'astronomie élémentaire et de la technique des cadrans solaires. Dans une présentation orthonormée classique x/y sur une année elle a une allure à deux bosses, les valeurs extrêmes étant à  $+14,5\text{ minutes}$  et  $-16,5\text{ minutes}$ . Pour une détermination de la latitude, *et* de la longitude, à partir du soleil de midi, il est nécessaire de disposer de la correction de hauteur, *et* de la correction en temps, respectivement.

# Analème

Voilà qu'il faut emporter, en plus de la montre, deux tables de corrections saisonnières de hauteur et de l'équation du temps. Cependant le dessin en « 8 » du cadran contient pour toute l'année<sup>5</sup> les informations nécessaires pour ces deux corrections. En réalité je ne disposais pas de l'analème, mais j'avais pris soin de noter avant mon embarquement dans une page de mon journal les valeurs utiles pour la période en mer (du 15 février à l'équinoxe, fig. 6). La ligne bleue rectiligne donne les corrections de hauteur solaire et la courbe rouge en-dessous la portion utile de l'équation du temps.

Figure 6

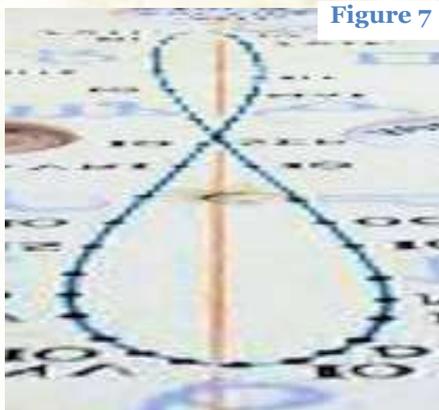
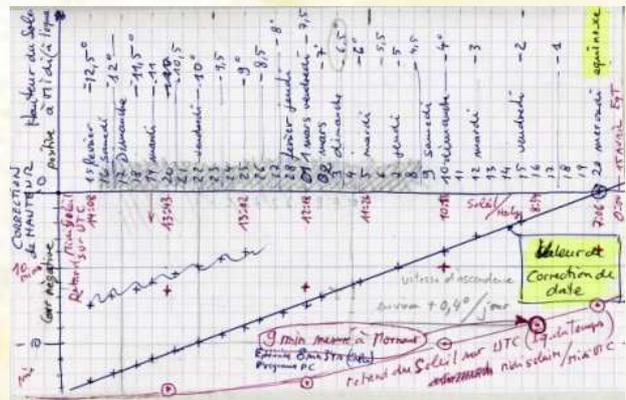
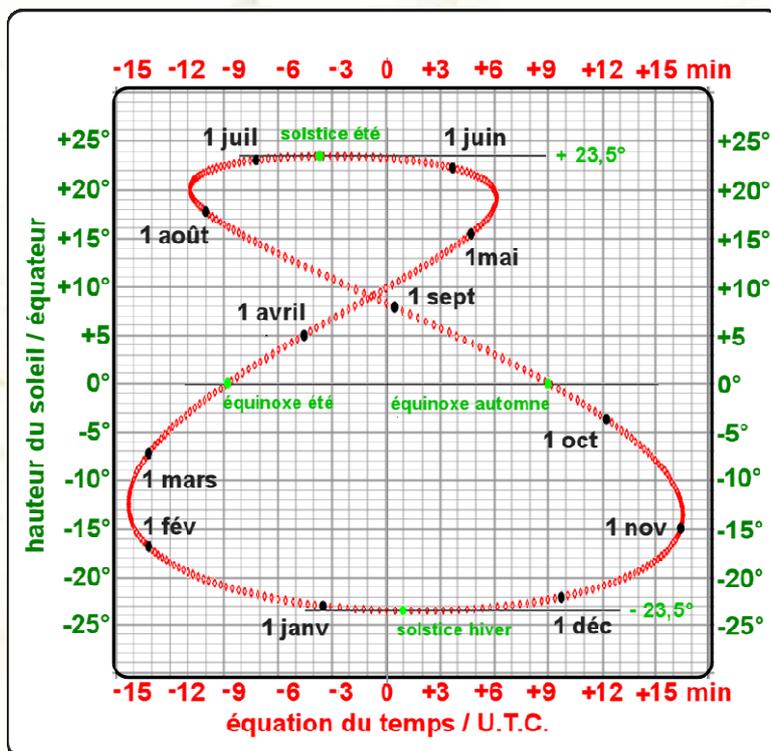


Figure 7

Examinons l'analème qui convient parfaitement pour décrire les caprices du parcours apparent du soleil puisqu'on peut y lire les indispensables corrections nécessaires pour faire le point avec le soleil. Il aurait sans doute bien aidé Christophe Colomb ! Vous pouvez voir (fig. 7) le « 8 » du cadran solaire distordu par traitement d'image : renversée et dilatée en largeur pour faire plus carré et avec les traits des heures (divergentes) rendues parallèles, l'image ressemble maintenant beaucoup à l'analème ci-dessous plus précis, avec un point rouge pour chaque jour de l'année (fig. 8). Sur celui-là on lit sur l'axe vertical en vert la correction saisonnière de la hauteur du soleil en degrés et sur l'axe horizontal en rouge la correction de l'heure en minutes de temps.



Analème de l'équation du temps

Avec un tel analème en poche on peut pour chaque jour de l'année :

- corriger la hauteur à midi et calculer la latitude exacte,
- corriger l'heure UTC de midi et obtenir la longitude correcte.

C'est magique !

Figure 8

## La longitude à midi

En réalité l'heure du passage du soleil au méridien local mesurée avec une horloge de référence (UTC) permet de connaître la *différence* de longitude entre la position à midi et le lieu de référence (Greenwich). En choisissant l'heure UTC on obtient donc la longitude telle qu'on a l'habitude de la mesurer par rapport au méridien de Greenwich. Je présente deux manières de s'y prendre.

### 1 - Par le passage du soleil au méridien

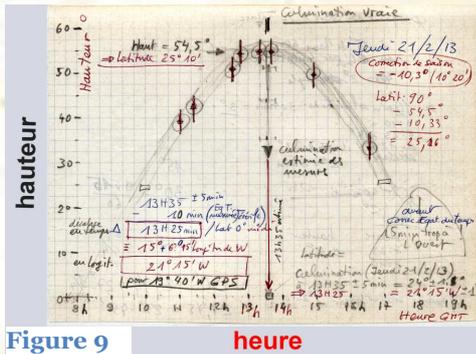


Figure 9 hauteur heure

Pour l'exemple, nous reprenons les observations solaires du jeudi 21 février déjà utilisées pour la détermination de la latitude et avec lesquelles il faut estimer l'heure du passage au sommet de la courbe (fig. 9). Le sommet est assez plat, alors je dessine un large chemin sombre qui englobe au mieux les barres d'erreur de chaque mesure pour faire apparaître un semblant de parabole (zone grisée au crayon). Je peux maintenant placer l'axe de symétrie vertical qui détermine l'heure  $T_m$  (UTC) du maximum observée dans une fourchette de 10 min environ. En corrigeant par l'équation du temps on a l'heure  $T_c = T_m + Eqt$ . C'est l'heure UTC de la culmination d'un soleil fictif parfaitement régulier.

Nous avons observé le passage au méridien à  $13h35 \pm 5 \text{ min}$  UTC. Pour ce jour là, l'anâlème propose une correction de -14 minutes (positif = retard, négatif = avance, du soleil par rapport à nos montres).

La différence entre l'heure UTC de midi local :  $T_c = T_m + Eqt = 13h35 - 14 \text{ min} = 13h21 \pm 5 \text{ min}$  et l'heure UTC de midi à Greenwich (heure et lieu de référence) est alors :  $13h21 - 12h = 1h21 \pm 5 \text{ min} = 1,33 \text{ heure}$ .

La conversion du décalage de temps de 1,33 h en décalage de longitude à raison de  $15^\circ/h$  est alors :

$15^\circ \times 1,33 = 20,25^\circ = 20^\circ 15' (\pm 1^\circ)$  ouest, pour un GPS de contrôle  $19^\circ 40' W$ , différence  $35'$  d'arc ! On voit que l'estimation de la précision de la culmination à  $\pm 5 \text{ min} = \pm 1^\circ$  était large.

### 2 - Par l'heure du lever et du coucher du soleil

Il s'agit en fait de calculer l'heure de midi solaire à partir des heures du lever et coucher ou de minuit *solaire* à partir des heures d'un coucher puis d'un lever qu'on a pu observer et noter. À très peu de chose près, la même durée sépare midi solaire du lever et du coucher il en est de même pour minuit. On alors l'heure  $T_m$  du passage du soleil au méridien (ou de son passage à minuit au méridien  $+ 180^\circ$  et au plus bas !). Le calcul est ensuite le même que précédemment pour obtenir la longitude à midi ou à minuit en fonction des nuages qui permettent ou non les observations. On peut donc calculer la longitude à minuit le lendemain matin, ou la longitude à midi le soir après le coucher du soleil en comparant l'heure de midi local à  $12:00 \text{ h}$  UTC ou l'heure de minuit local à  $00:00 \text{ h}$  UTC. Dans les deux cas le décalage en temps correspond au décalage en longitude ; en bref on saura ou on était 6 heures auparavant et c'était déjà le cas lorsqu'on trace la courbe de culmination ! Il faut bien sûr toujours faire la correction de l'équation du temps :  $T_c = T_m + Eqt$ .

Notez qu'il faut faire les deux relevés, lever et coucher de la même manière, soleil tangent sur l'horizon ou sous l'horizon. Si à cause des nuages, on ne voit que le premier ou le dernier contact avec l'horizon, on peut passer de l'un à l'autre, sans faire d'erreur de plus d'une minute, en ajoutant ou retranchant trois minutes, le temps moyen mis par le soleil dans les basses latitudes pour passer d'une position tangente sur l'horizon à la position tangente sous l'horizon ou vice versa. Il est d'ailleurs aisé de relever précisément le temps mis par le soleil pour franchir les deux positions de tangence dans les latitudes où l'on navigue, et de la noter dans ses tablettes.

## Résultats

Étoile polaire, lever, coucher, et culmination du soleil, tout est bon à prendre pour ne pas se perdre dans l'immense océan. Les résultats des observations résumés dans le tableau 1 ci-dessous permettent de chiffrer les incertitudes des mesures.

événements			corrections		observations en degrés		position GPS en degrés		erreurs d'observation en minutes d'arc		
	type d'observation	date	corr. soleil / équateur en degrés	équation du temps en minutes	latitude observée en degrés	longitude observée en degrés	latitude GPS en degrés	longitude GPS en degrés	err. en latitude (val observée - GPS)	err. en longitude (val observée - GPS)	remarques
1	méridienne Soleil	19/02/2013	11,0	14,0	29,00	15,25	28,78	16,25	13	-60	midi Tenerife
2	méridienne Soleil	20/02/2013	10,7	14,0	27,00	20,25	27,11	17,75	-7	150	midi
3	méridienne Soleil	21/02/2013	10,3	14,0	25,00	20,20	24,89	19,66	7	32	midi
4	étoile polaire	21/02/2013	10,3	14,0	24,50	-	25,80	-	-78	-	nuit en mer
5	étoile polaire	23/02/2013	9,5	13,7	19,70	-	20,28	-	-35	-	nuit en mer
6	étoile polaire	24/02/2013	9,2	13,7	17,20	-	18,58	-	-83	-	nuit en mer
7	coucher/lever	24/02/2013	9,2	13,7	-	24,37	-	24,57	-	-12	soir/matin
8	étoile polaire	25/02/2013	8,8	-13,5	16,00	-	16,45	-	-27	-	nuit en mer
9	étoile polaire	27/02/2013	8,0	13,5	14,50	-	14,77	-	-16	-	nuit en mer
10	coucher/lever	27/02/2013	8,0	13,3	-	-	-	-	-	-	nuit en mer
11	étoile polaire	01/03/2013	7,3	13,0	14,20	-	14,95	-	-45	-	nuit en mer
12	méridienne Soleil	03/03/2013	6,5	13,0	15,50	45,50	15,07	45,73	26	-14	midi
13	lever/coucher	05/03/2013	5,8	12,5	-	50,00	-	50,90	-	-54	matin/soir
14	coucher/lever	05/03/2013	5,8	12,5	-	51,25	-	51,54	-	-17	soir/matin
15	étoile polaire	07/03/2013	5,0	11,0	12,30	-	12,80	-	-30	-	nuit en mer

latitudes	incertitude moyenne sur l'ensemble des observations de latitude $\pm$	42	minutes d'arc (11 obs.)
	incertitude de latitude par la culmination du soleil $\pm$	15	4 observations (' d'arc)
	incertitude de latitude par la polaire $\pm$	51	7 observations (' d'arc)
	moyenne des erreurs sur l'observation de la polaire = -45	erreur systématique ?	
	incertitude de lat. avec correction de hauteur polaire de 45' $\pm$ 24	corrigée de l'erreur systématique	
longit.	incertitude moyenne sur l'ensemble des observations de longitude $\pm$	66	minutes d'arc (7 obs.)
	incertitude de longitude par la culmination du soleil $\pm$	83	4 observations (' d'arc)
	incertitude de longitude par lever et coucher du soleil $\pm$	33	3 observations (' d'arc)

Tableau 1

Les **latitudes** par culmination du soleil de midi sont les meilleures au  $\frac{1}{4}^{\circ}$  (15' d'arc),

Les **latitudes** par la polaire sont presque à  $1^{\circ}$  près (51' d'arc) et systématiquement trop basses (note2),

Les **longitudes** par lever et coucher du soleil sont les meilleures à  $\frac{1}{2}^{\circ}$  près (33' d'arc),

Les **longitudes** par la méridienne sont moins bonnes : incertitude de  $1,5^{\circ}$  (83').

## Annexes

---



### Utilisation de l'astrolabe

**Vent** : Il est assez difficile d'utiliser cet astrolabe lorsqu'on se trouve exposé au vent. En effet ce n'est pas une bonne idée de la faire en contreplaqué. C'était pour faire vite et facile !

**Poids** : Un support principal fait d'une plaque métallique d'épaisseur conséquente aurait sans aucun doute été bien plus stable dans le vent. Il est fort probable que cela aurait amélioré le maintien de la direction verticale de « fil à plomb ». Une tige supérieure de suspension plus longue aurait-elle encore facilité son maintien vertical tenu à la main par l'anneau supérieur lorsque le bateau roule ? Ce n'est pas si sûr, mais j'étais avantagé par le catamaran qui a moins mouvements de roulis comparé à un monocoque.

**Corrections** : Inutiles ou négligeables dans notre cas, certaines corrections classiques en navigation n'ont pas eu droit de cité compte tenu de la précision attendue d'un astrolabe et de la lecture pas plus précise sur l'anâlème de la valeur des deux corrections principales. Ainsi ne sont pas prises en compte

- La parallaxe entre le centre de la terre et l'observateur (pour le soleil et tous les astres de notre système solaire)
- La réfraction atmosphérique qui fait mesurer l'angle d'un rayon lumineux courbe à la place de l'angle vrai. Elle devient importante à moins de  $10^\circ$  de hauteur au-dessus de l'horizon.
- La correction due à la hauteur de l'observateur au-dessus de l'eau est un paramètre sans effet puisque nous n'utilisons pas la direction de l'horizon mais une référence à  $90^\circ$  de la direction verticale.
- Les valeurs de corrections de hauteur et de temps lues sur un analème de petite dimension sont assez imprécises. Il est avantageux d'utiliser un tableau de valeurs journalières précises.
- Les corrections pour le **midi**<sup>6</sup> solaire (ou minuit) qui n'est pas strictement confondu avec le milieu du jour entre le lever et le coucher du soleil.

### Bâton de Jacob

Au moyen-âge on utilisait aussi un instrument très simple en forme de croix appelé « bâton de Jacob » (*fig. 10*) pour effectuer des mesures angulaires. Avec un instrument en forme de croix, on visait en faisant coulisser la petite branche sur la grande tige graduée en angles. A terre, en position bien stable, cet instrument pouvait convenir pour les mesures angulaires, il fallait en effet viser dans deux directions simultanément, mais pour les besoins maritimes, viser le soleil, trop éblouissant, et l'horizon simultanément n'est pas envisageable.



Figure 10

## Le temps

« *Qu'est-ce que le temps ? Si personne ne me le demande, je sais.  
Si on me le demande et que je veux l'expliquer, je ne sais plus.* »

Saint Augustin, Les Aveux  
Chap. XI, 17 (an ~ 400)

### TAI - Temps Atomique International.

C'est un temps scientifique établi et maintenu par un établissement français, le Bureau International des Poids et Mesures. Il est défini par la coordination de quelques 350 horloges atomiques dans différents pays du monde entier. C'est « le » temps de référence basé sur la définition de la seconde étalon de 1967 qui dérive d'une propriété extrêmement stable de l'atome de Césium. Cette définition a remplacé celle basée sur l'année tropique 1900 utilisée de 1956 à 1967. Le TAI lui-même a été adopté en 1972 comme référence universelle de temps. Sa stabilité à 10-14 signifie que sa dérive ne dépassera pas 1 s en 3 millions d'années ! C'est sur ce temps qu'est basé le temps civil UTC qui n'en diffère que par un décalage d'un nombre entier de secondes.

### UTC - Temps Universel Coordonné.

Ce temps est utilisé pour tous les besoins civils, de fuseaux horaires, d'horloge parlante, de communications etc. En 1972, lorsque le TAI a été adopté comme référence de temps universel à la place de la référence à l'année tropique 1900 qui était utilisée depuis 1956, le temps UTC que l'on garde calé sur les jours réels avait déjà dérivé de 10 secondes par rapport aux horloges atomiques depuis 1967 où les deux temps avaient été mis en phase. A force d'ajouts de secondes intercalaires (la dernière date du 30 juin 2012) pour tenir compte du ralentissement inéluctable de la vitesse de rotation de la terre, UTC est décalé actuellement de 35 secondes sur TAI. Nos jours s'allongent, bonne nouvelle ! Ceci montre aussi, maintenant que la mesure du temps est ce que l'Homme sait faire avec le plus de précision, que les cycles astronomiques fluctuent beaucoup trop pour servir de référence au temps. Le plus petit intervalle de temps mesuré, dans un labo à Berlin, je crois (*Nature février 2004*), une mesure de 2004 est de 10-17 s qui signifie 1 s de dérive sur 3 milliards d'années).

### UT - Temps Universel.

Moins utile pour le commun des mortels, le Temps Universel est une échelle de temps basée sur la rotation de la Terre, donc utilisée par les spécialistes dont le travail dépend très précisément de la rotation terrestre. Cette rotation étant fluctuante à court terme, ils ont besoin d'en tenir compte. La mesure de la rotation terrestre et le Temps Universel qui en dérive sont gérés par le Service International de la Rotation terrestre et des Systèmes de Référence (IERS) et l'Union internationale des télécommunications arbitre sa diffusion. Il existe plusieurs versions spécialisées du Temps Universel :

- UTo : non corrigé du mouvement des pôles géographiques.
- UT1 : dérive d'UTo en corrigeant des effets du mouvement des pôles géographiques.
- UT1R : une valeur lissée d'UT1, les variations de rotation terrestre sont filtrées sur un mois.
- UT2 : une ancienne valeur d'UT1 lissée, n'a qu'un intérêt historique.

### GMT - à oublier !

Ce sigle (Greenwich Mean Time) souvent interprété à tort par Greenwich Meridian Time était le temps en service avant 1972, année de l'établissement du temps UTC. Mais les sigles ont la vie dure et comme les noms de rue, lorsqu'ils changent, l'ancien nom est encore utilisé pendant des décennies, voire des générations ?

## Un amusement, mesurer l'équation du temps

C'est très simple. Connaissant la longitude du lieu où l'on se trouve, on calcule l'heure UTC  $T_c$  (celle des montres) du passage du soleil au méridien en ce lieu par la sempiternelle relation solaire : 1 heure de temps pour parcourir 15 ° de longitude. Ensuite on procède à la mesure de l'heure  $T_m$  UTC du passage du soleil au méridien. La différence entre l'heure réelle observée  $T_m$  et l'heure théorique calculée  $T_c$  traduit l'avance ou le retard du soleil réel par rapport midi UTC des horloges. C'est la valeur de l'équation du temps pour ce jour de l'année

$$Eq_t = T_c - T_m$$

Il faut donc observer l'heure du passage du soleil au méridien. Cela peut se faire soit avec l'astrolabe (fig. 11) soit avec un cadran solaire :

### Avec l'astrolabe

En traçant, comme nous l'avons déjà fait, une courbe de hauteur du soleil sur un graphique de hauteurs et heures des relevés, on mesure facilement l'heure  $T_m$  du passage au méridien du lieu et on a  $Eq_t = T_c - T_m$

Matériel nécessaire : astrolabe, papier, crayon, soleil et ¼ d'heure pour la faire la mesure et le calcul de  $T_c$ .

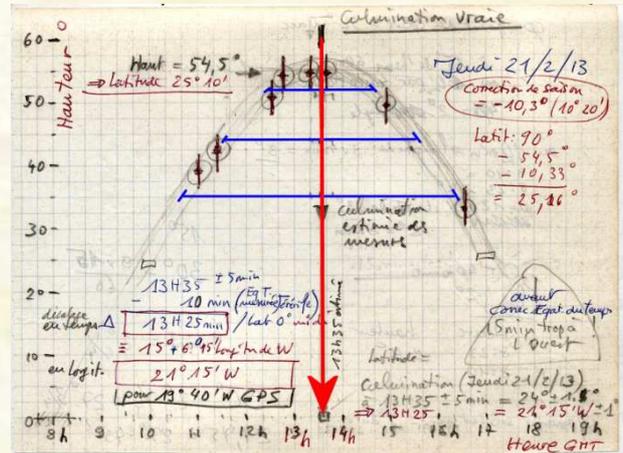


Figure 1

### Avec un cadran solaire improvisé

Avec une équerre posée sur un plan horizontal Julien a relevé, accentuée en orange sur la photo 3, la trace du soleil passant à travers un oculus O au sommet de l'équerre. Les points P1 et P2 sont obtenus avec un compas centré en C, projection verticale de l'oculus. Ils permettent de tracer l'axe de symétrie qui définit le nord, passe par C et coupe le trajet du soleil en un point M définissant l'instant  $T_m$  du passage du soleil au méridien du lieu. En notant les heures UTC à côté de chaque point il suffit d'interpoler l'heure  $T_m$  au point M par une règle de trois à partir des deux proches voisins. L'heure  $T_m$  UTC du midi solaire en ce lieu et l'heure théorique calculée  $T_c$  permettent ainsi de calculer de la même manière  $Eq_t = T_c - T_m$ . En outre si on mesure la hauteur de l'oculus au-dessus de C et la distance CM on peut construire un triangle dont l'un des angles est une mesure la hauteur du soleil à la culmination, ce qui, avec la correction de saison fournit la latitude du lieu. Julien (photo 2), connaissant alors précisément la distance qui le sépare de l'équateur (45,61° N) et celle qui le sépare de Greenwich (4,66° Ouest), réalise alors qu'il est dans le jardin de son grand-père !

Matériel nécessaire : table, équerre, papier, crayon, compas d'écolier, soleil, calcul de  $T_c$ , un assistant disposant d'une ½ journée pour la faire les mesures.



Photo 2

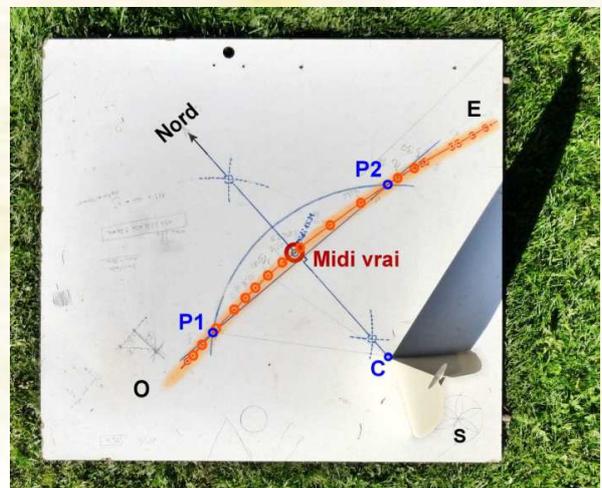


Photo 3

## Références

### Sur le temps :

L'horloger John Harrison : [fr.wikipedia.org/wiki/John\\_Harrison\\_%28horloger%29](http://fr.wikipedia.org/wiki/John_Harrison_%28horloger%29)  
 Amateurs d'horlogerie ancienne : [www.afaha.com/](http://www.afaha.com/)  
 Horloge atomique [fr.wikipedia.org/wiki/Horloge\\_atomique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Horloge_atomique)  
 Astronomie : "L'astronomie des anciens" Yaël Nazé - BELIN

### Sur l'équation du temps

Calculateur de l'équation du temps sur PC :

[www.logitheque.com/logiciels/windows/education/maths\\_calculs/telecharger/equation\\_du\\_temps\\_18096.htm#telechargement-produit](http://www.logitheque.com/logiciels/windows/education/maths_calculs/telecharger/equation_du_temps_18096.htm#telechargement-produit)  
[olravet.free.fr/Equation.zip](http://olravet.free.fr/Equation.zip)

Tableau des valeurs quotidiennes :

[obswww.unige.ch/Questions\\_Reponses/edtxyzad.htm](http://obswww.unige.ch/Questions_Reponses/edtxyzad.htm)

L'équation du temps, courbe x/y :

[michel.lalos.free.fr/cadrans\\_solaires/outils/Graph-eq-temps-cn.php](http://michel.lalos.free.fr/cadrans_solaires/outils/Graph-eq-temps-cn.php)

L'équation du temps, table de déclinaison solaire et de l'équation du temps :

[michel.lalos.free.fr/cadrans\\_solaires/doc\\_cadrans/cal\\_gnomonique\\_2013.pdf](http://michel.lalos.free.fr/cadrans_solaires/doc_cadrans/cal_gnomonique_2013.pdf)

Outils de cadran solaire : [http://michel.lalos.free.fr/cadrans\\_solaires/outils/outils\\_gno.html](http://michel.lalos.free.fr/cadrans_solaires/outils/outils_gno.html)

### Sur la longitude

Cours de navigation de L'École Navale à l'usage des Officiers de Marine.

Gallilée le géomètre dans la revue « Géomètre », No 2101 mars 2013, page 44

Histoire de la longitude

[michel.lalos.free.fr/cadrans\\_solaires/doc\\_cadrans/hist\\_longitude.html](http://michel.lalos.free.fr/cadrans_solaires/doc_cadrans/hist_longitude.html)

Histoire de la navigation astronomique :

[fr.wikipedia.org/wiki/Histoire\\_de\\_la\\_navigation\\_astronomique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_la_navigation_astronomique)

Invention Europe "Et la longitude fut" :

[www.invention-europe.com/Article690.htm](http://www.invention-europe.com/Article690.htm)

Bâton de Jacob :

[fr.wikipedia.org/wiki/Arbalestrille](http://fr.wikipedia.org/wiki/Arbalestrille)



### Sur Christophe Colomb

[www.professeurphifix.net/eveil/histoire\\_colomb.pdf](http://www.professeurphifix.net/eveil/histoire_colomb.pdf)

[fr.wikipedia.org/wiki/Christophe\\_Colomb](http://fr.wikipedia.org/wiki/Christophe_Colomb)

Le regard personnel de Thierry Crouzet :

[blog.tcrouzet.com/2009/06/05/1%E2%80%99erreur-de-christophe-colomb/T%C3%A9l%C3%A9chargements](http://blog.tcrouzet.com/2009/06/05/1%E2%80%99erreur-de-christophe-colomb/T%C3%A9l%C3%A9chargements)

Ses bateaux : [www.herodote.net/1492-synthese-119.php](http://www.herodote.net/1492-synthese-119.php)



La traversée

## Notes

---

### <sup>1</sup> Culmination

Si on se trouve entre les tropiques et que le soleil passe vers le zénith il est difficile de viser à la verticale. Il faut donc mesurer vers nord et le sud. Le soleil serait au-delà de  $90^\circ$  s'il était au nord du zénith nord alors que l'on vise vers le sud ou inversement ! Dans ces cas faut disposer d'une boussole pour mesurer dans les deux directions et rejeter la valeur supérieure à  $90^\circ$  qui déterminera l'hémisphère de l'observateur. La valeur absolue de l'écart à  $90^\circ$  devra être la même dans les deux mesures puisque c'est la latitude !

### <sup>2</sup> L'étoile polaire.

Elle n'est pas exactement au nord mais elle décrit un petit cercle autour du pôle nord céleste et se trouve à 1 degré du pôle du côté de Cassiopée. Si cette constellation est visible à droite ou à gauche de l'étoile polaire le pôle vrai et l'étoile sont cote à cote à la même hauteur, mais si Cassiopée se trouve au-dessus, cela veut dire que la mesure de latitude sera surestimée de  $1^\circ$  ou sous-estimée de  $-1^\circ$  si la constellation est sous l'horizon. Nos mesures de latitude par la polaire sont toutes trop faibles et la moyenne des erreurs est  $-3/4^\circ$  ( $45'$  d'arc). On peut en déduire que la polaire était en février-mars  $3/4^\circ$  au-dessus du pôle nord vrai. Effectivement la constellation de Cassiopée n'était pas visible. Comme nous ne faisons aucune correction de position réelle de l'étoile, tout cela est plausible. Si à posteriori nous tenions compte d'une erreur systématique de  $-45'$  pour la hauteur, l'incertitude de latitude ne serait plus que de  $24'$  d'arc.

### <sup>3</sup> Galilée

Il ne disposait pas encore d'horloges pouvant donner la même heure exacte en deux lieux différents, il a utilisé comme top de synchronisation de ses mesures de hauteur les occultations des satellites de Jupiter qu'il venait de mettre en évidence et qui étaient observables en deux lieux éloignés grâce à la lunette astronomique nouvellement inventée. C'était possible à terre où l'on pouvait installer un appareillage lourd et stable utilisé par une équipe d'astronomes faisant les observations.

### <sup>4</sup> Longitude Act.

La catastrophe navale du 22 octobre 1707 qui a conduit au naufrage de la flotte anglaise au large des îles Scilly avec quatre vaisseaux de ligne et entre 1 400 à 2000 marins perdus est l'un des plus importants désastres maritimes dans l'histoire des îles britanniques. Il fut déterminé par la suite que la principale cause de ce naufrage était l'incapacité des navigateurs d'alors de calculer précisément leur latitude faute de chronomètres précis, ce qui conduisit le parlement britannique à lancer un concours connu sous le terme "Longitude Act" de juillet 1714 qui devait apporter une réponse à la mesure en mer de la longitude. Les britanniques, toujours très pragmatiques, ont évalué la récompense en fonction de la précision de la méthode et du résultat obtenu :

- 10 000 £ pour une longitude déterminée à mieux que 60 miles nautiques (111 km)
- 15 000 £ pour une longitude déterminée à mieux que 40 miles nautiques (74 km)
- 20 000 £ pour une longitude déterminée à mieux que 30 miles nautiques (56 km)

Avec les meilleures positions obtenue avec l'astrolabe maison ( $<30'$ ) j'aurais eu droit aux 20 000 £ !

### <sup>5</sup> Stabilité de l'analème

L'excentricité de l'orbite terrestre subit des variations en quelques millions d'années dues aux autres planètes de notre système solaire, ce qui se traduit par des variations sur la largeur des boucles, mais sur un millénaire, les changements ne sont pas extrêmement importants, laissant l'analème qualitativement inchangée.

De plus l'inclinaison de l'axe de la terre n'est pas tout à fait constante à court terme, en raison des autres planètes et de la lune, ce qui entraîne des variations de la position réelle du pôle nord pouvant atteindre une vingtaine de mètres

D'autre part, l'orientation de l'axe de rotation de la terre subit aussi un mouvement de précession de 26 000 ans, ce qui veut dire que la grande et la petite boucle de l'analème s'échangent tous les 13 mille ans !

### <sup>6</sup> Midi et lever/coucher du soleil.

Midi et minuit solaire ne sont pas à la mi-temps du coucher-lever du soleil. En effet si, la durée des jours successifs est en augmentation ou en diminution respectivement au printemps et ou en automne ( $\pm 4 \text{ min}$ ), il en est de même pour les demi-journées qui se suivent ( $\pm 2 \text{ min}$ ). L'erreur maximum du milieu du jour ou de la nuit ainsi déterminé n'excèdera donc jamais  $1/2 \text{ min}$  par rapport au midi ou minuit solaire vrai. Matinées et après-midi solaires ne sont sensiblement égales qu'aux solstices, cette erreur est alors négligeable.