Les Cahiers de la S.R.D.

10

NAVIGATION ASTRONOMIQUE

2 Deux droites pour un point

Avertissement

Ces cahiers ont pour vocation de synthétiser les connaissances relatives à chacun des thèmes abordés. Ils sont le fruit de la mutualisation des expériences communes des auteurs en matière de navigation.

Ils ne nécessitent pas de pré-requis scientifiques pour leur compréhension. Mais ils essaient néanmoins de ne pas céder à la facilité de la simplification abusive qui fausserait l'intention initiale : celle de faire comprendre les interactions complexes qui régissent le fonctionnement d'un voilier.

Malgré toute l'attention qui a été portée à la rédaction de ces pages, certaines erreurs ou imprécisions peuvent subsister. Les auteurs s'en excusent et remercient le lecteur pour son indulgence. Ils le remercient également de leur faire part de ses remarques et suggestions.

Bonne lecture et surtout bonnes navigations,

Les auteurs

NAVIGATION ASTRONOMIQUE
DEUX DROITES POUR UN POINT

2 ELÉMENTS DE MÉCANIQUE CÉLESTE

Les éléments précédents nous donnent tous les outils mathématiques nécessaires à l'approche de la navigation astronomique, allons faire maintenant un peu de mécanique céleste.

2.1 DIRECTION DES RAYONS LUMINEUX ISSUS D'UN ASTRE

Si nous voyons depuis la Terre un astre, c'est que nous recevons les rayons lumineux qu'il émet. Il les émet à priori dans toutes les directions, or comme la distance terre-Astre est éminemment grande, ces rayons nous apparaissent tous sous le même angle (la différence d'angulation de deux rayons est très faible). *Figure 16*

On considérera donc que tous les rayons issus de l'astre nous arrivent tous sous la forme d'un faisceau de rayons parallèles.

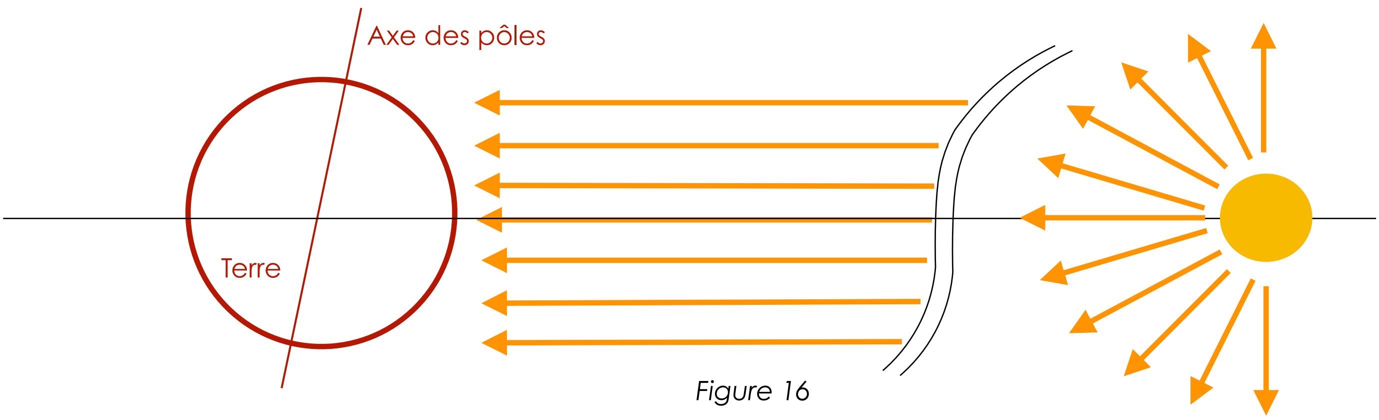


Figure 16

Pour deux observateurs situés à 10 m l'un de l'autre, sachant que la distance terre-soleil moyenne est d'environ 150 millions de km, la différence angulaire δ entre les rayons qu'ils reçoivent respectivement du soleil est de :

Tan δ = 10/ 150 000 000 000 soit un angle δ = 0,0000000038° = 0,00000023'=0,0000137''

Différence excessivement faible et imperceptible !

2.2 DÉCLINAISON DU SOLEIL ET NAVIGATION CÉLESTE

L'ensemble des planètes se déplaçant autour du soleil ont leurs orbites contenues dans une surface sensiblement plane, ce plan est appelé **plan de l'écliptique** et contient le centre de la Terre et celui du soleil. *Figure 17*

L'orbite du centre de la Terre par rapport au soleil est une ellipse très proche de la forme d'un cercle dont le soleil occupe l'un des foyers(les deux foyers étant très proches).

L'axe de rotation de la Terre sur elle-même est incliné par rapport au plan de l'écliptique d'un angle de 23° 26'21'' ou 23,44°. Cet angle reste constant.

Pendant la rotation de la Terre autour du soleil la distance Terre-Soleil varie (puisque l'orbite de la Terre est elliptique). Lorsque la distance est la plus grande nous sommes aux **solstices** d'été et d'hiver Lorsque cette distance est la plus faible, ce sont les **équinoxes** de printemps et d'automne

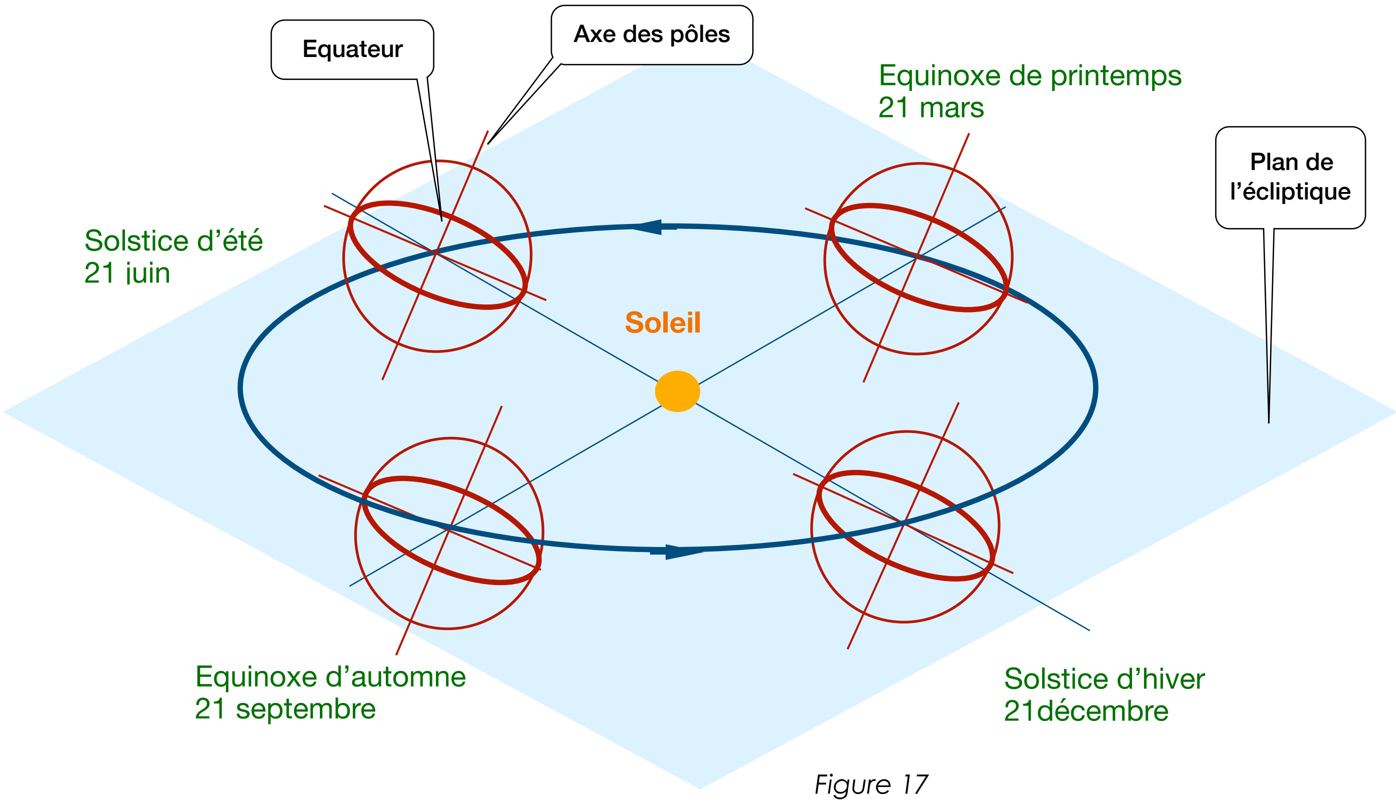


Figure 17

Aux solstices les rayons du soleil frappent la Terre avec une inclinaison[1] maximale correspondant à l'inclinaison de l'axe des pôles. *Figure 18*

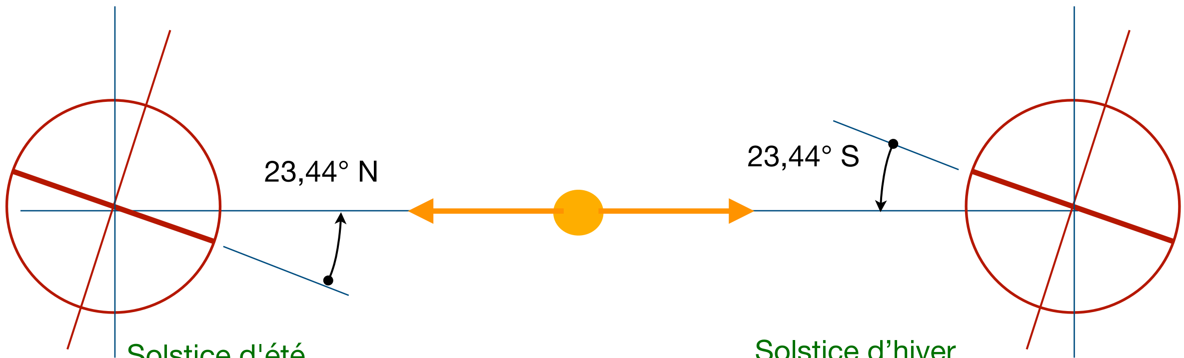


Figure 18

Aux équinoxes, les rayons du soleil frappent la Terre avec une inclinaison nulle. *Figure 19*

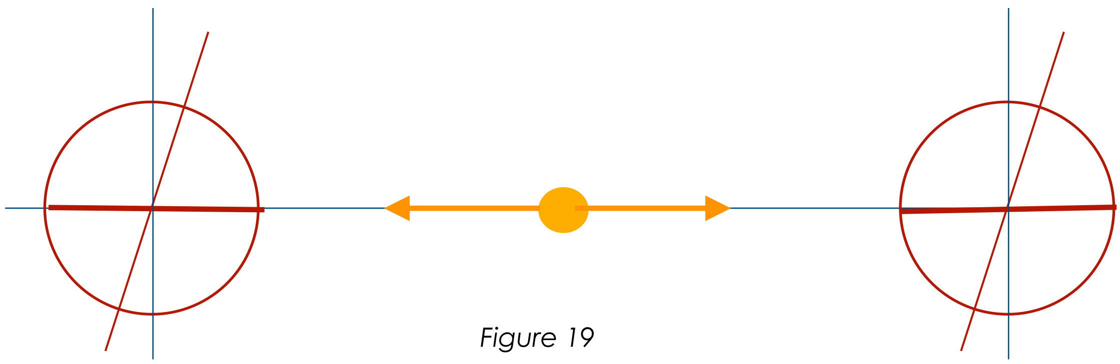


Figure 19

[1] inclinaison des rayons par rapport au plan équatorial.

La **Déclinaison** correspond à l'angle avec lequel les rayons du soleil arrivent sur la Terre. On voit que cette déclinaison varie sur l'année puisqu'elle passe de 23,44° N au solstice d'été pour s'annuler à l'équinoxe d'automne, ré-augmenter pour culminer à 23,44°S à l'équinoxe d'hiver et s'annuler à nouveau au solstice d'hiver.

2.3 REPÉRAGE DU SOLEIL PAR RAPPORT À LA TERRE

En imaginant une droite qui relie le centre du Soleil à celui de la Terre, on constate qu'elle coupe la sphère terrestre en un point Pg appelé position géographique. *Figure 20*

Cette droite est inclinée par rapport à l'équateur, son inclinaison correspond à la déclinaison **D** du soleil à cet instant.

Pg est situé dans un méridien. On en mesure sa position par rapport au méridien de référence. Cette position est notée **AHvo** et s'appelle : **l'angle horaire du soleil au méridien de Greenwich.**

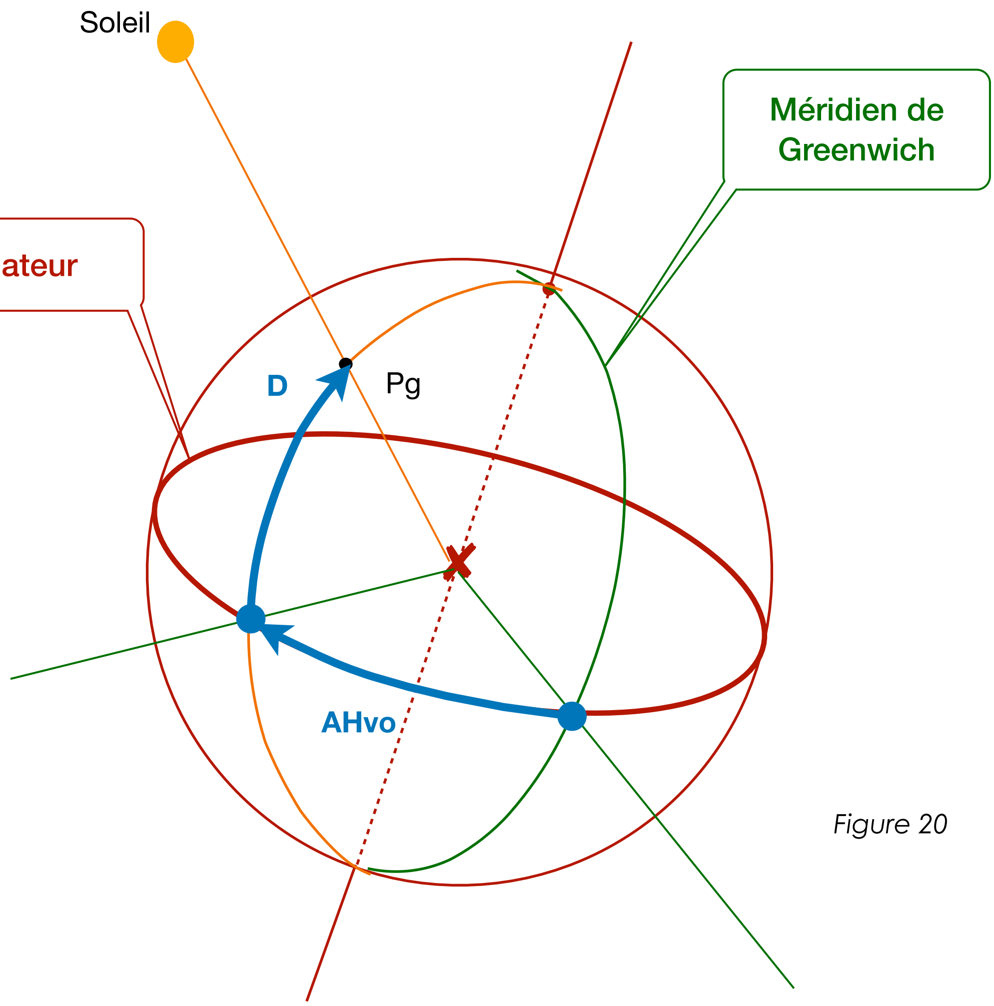


Figure 20

AHvo et **D** sont tout simplement les coordonnées sur terre pour le point Pg à l'heure TU . Pour le point Pg, **D** équivaut à la latitude et **AHvo** équivaut à la longitude à cet instant.

La Déclinaison du soleil (latitude) ne peut jamais dépasser le 23° 44' N ou bien 23°44' S, ce point Pg nous sera très utile pour trouver notre position.

2.4 LES ÉPHÉMÉRIDES NAUTIQUES

Ce document donne pour chaque jour de l'année et pour chaque heure TU, la déclinaison **D** et l'angle horaire du soleil au méridien de Greenwich **AHvo**.

2.4.1 Au sujet de AHvo et de la longitude G

L'angle AHvo est donné de 0° à 360° vers l'ouest, sans signe plus ou moins.

La longitude G est donnée de 0à 180° vers l'ouest ou l'est.

Il y a donc des précautions à prendre là encore pour passer d'un système à l'autre pour positionner Pg. *Figure 21*

Terre vue du pôle Nord

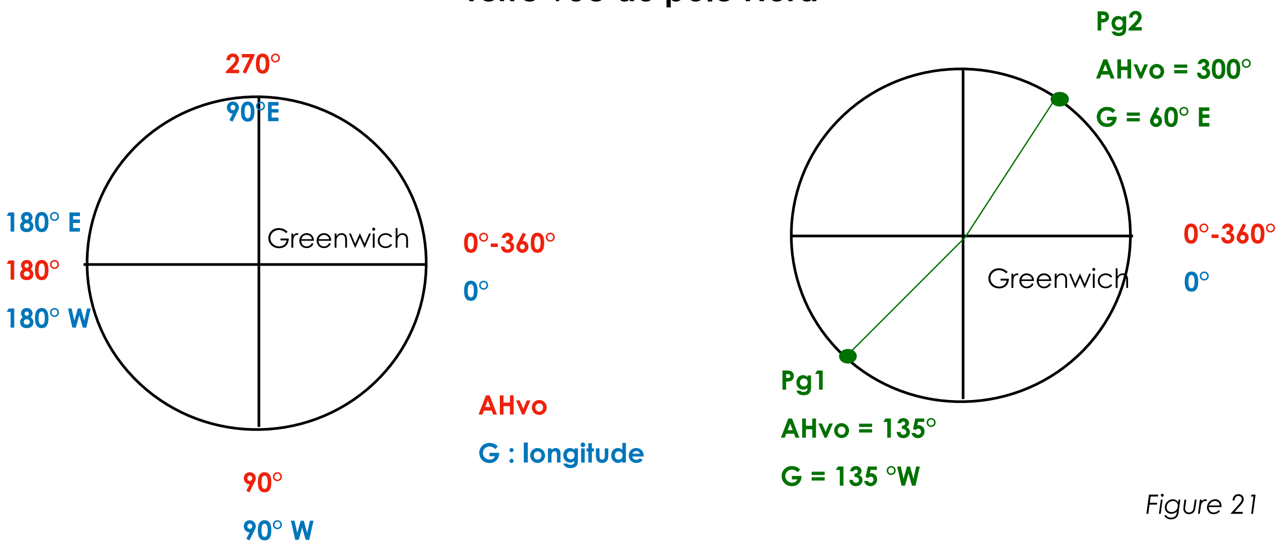


Figure 21

2.4.2 Une page d'éphémérides et interpolation

Le tableau ci-contre est extrait de la page des éphémérides du 9 avril 2025.

On y constate que l'évolution de l'angle horaire solaire présente une croissance linéaire à un taux de 0,25 degré par minute, connu sous le nom de « temps en arc ».

Cette expression traduit la relation entre le temps et l'augmentation de l'angle solaire correspondant.

Aussi connu sous le nom de partie proportionnelle de l'angle horaire du soleil (+ pp).

Ahvo augmente de 15° chaque heure ou de 0,25° par minute.

Nous aurons besoin de connaitre l'angle horaire AHvo et la déclinaison D à la seconde TU près. Il nous faut donc effectuer une interpolation.

Ce 9 avril 2025 quelles sont les valeurs de AHvo et D à 10 h 27 min 15 s ?

A 10 h AHvo = 329°37,3' et D = 7°44,7' N

A 11h AHvo = 344°37,5' et D = 7°45,6' N

Les valeurs cherchées se situeront entre les valeurs données pour les deux heures TU.

À 10h 27 min 15 s, nous serons 27 min 15 s après 10h, soit 27 min 15s de plus ou 27,25 min.A raison de 0,25° par minute, nous aurons donc une augmentation de l'angle AHvo de : 27,25x0,25.

Soleil					
Heure U.T.	AHvo		Déclinaison		
h	°	'	°	'	
O	179	35,6	7	35,4	N
1	194	35,8		36,3	
2	209	36,0		37,3	
3	224	36,1		38,2	
4	239	36,3		39,1	
5	254	36,5		40,1	
6	269	36,7	7	41,0	N
7	284	36,8		41,9	
8	299	37,0		42,8	
9	314	37,2		43,8	
10	329	37,3		44,7	
11	344	37,5		45,6	
12	359	37,7	7	46,5	N
13	14	37,8		47,5	
14	29	38,0		48,4	
15	44	38,2		49,3	
16	59	38,4		50,3	
17	74	38,5		51,2	
18	89	38,7	7	52,1	N
19	104	38,9		53,0	
20	119	39,0		54,0	
21	134	39,2		54,9	
22	149	39,4		55,8	
23	164	39,5		56,7	
24	179	39,7	7	57,7	N
	v =	0,2'	d =	0,9'	
	1/2 Diam. =	*15,97'*			

Soit : 6,8125° ou encore 6° 0,825x60 '= 6°48,75'

D'où AHvo = 329°37,3' + 6°48,75' = 336° 26,05'

La déclinaison évolue de 7°44,7' N à 7°45,6' N, soit une augmentation de 0,9' en 60 minutes. En 27 min 15s, l'augmentation sera donc de : 0,9x 27,25/60 = 0,40875'

D'où D = 7°44,7' N + 0,40875'= 7°44,11'

Des tables d'interpolation figurent dans les éphémérides. Nous les examinerons quand nous utiliserons le sextant.

3 FAIRE LE POINT AVEC LA DROITE DE HAUTEUR

3.1 ETAPE DE SYNTHÈSE

Il est maintenant temps de faire une synthèse des différents éléments à notre disposition. *Figure 22*

Nous sommes sur un bateau quelque part sur la surface de la Terre au point A, point repéré par une latitude L , par exemple 46° N, et une longitude G, par exemple 12° E.
L'axe prolongeant OA est celui du zénith du lieu, plus familièrement l'axe de la verticale du point A.
La direction du soleil à partir du centre de la Terre coupe la surface de la Terre en un point Pg (position géographique)qu'on appelle parfois de manière imagée le "pied du soleil". A cet endroit sur Terre, le soleil est à la verticale (au zénith) du lieu.

La projection de l'axe du zénith du lieu et celle de la direction du soleil sur l'équateur font un angle **AHvg** sur le plan de l'équateur, appelée **angle horaire local**, parce qu'il varie en fonction de l'heure de la journée en raison de la rotation de la terre et de la position du navire. Nous aurons :

- Si G est E : AHvg=AHvo+G
- Si G est W : AHvg = AHvo-G

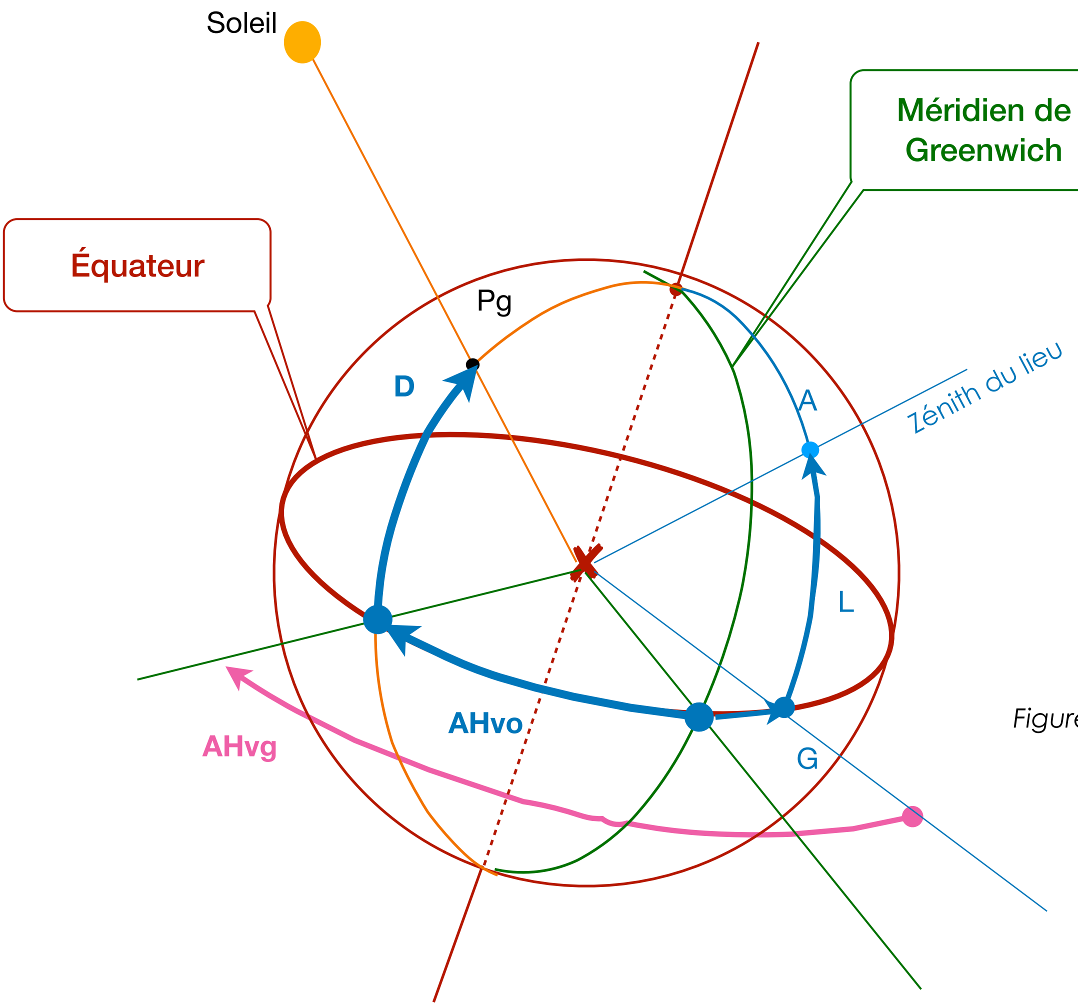


Figure 22

Cet angle AHvg mesuré dans le plan équatorial est aussi l'angle que forment les deux tangentes au méridiens passant par A et Pg au pôle Nord.

On se retrouve un triangle sphérique avec les points Pg, A et le pôle Nord. On connait par les éphémérides D, AHvo et on recherche L et G du point A. Nous n'avons pas encore assez de données pour résoudre le problème avec la formule des cosinus.

3.2 UN APPORT D'INFORMATION PAR LA MESURE AU SEXTANT

Nous allons nous situer par rapport au point Pg, le sextant va nous donner la distance par rapport à ce point.

Le sextant nous donne la hauteur angulaire du Soleil au dessus de l'horizon, notée **H.** (Nous verrons plus loin le détail de cette mesure à l'aide du sextant et les précautions à prendre ainsi que les corrections à effectuer). *Figure 23*

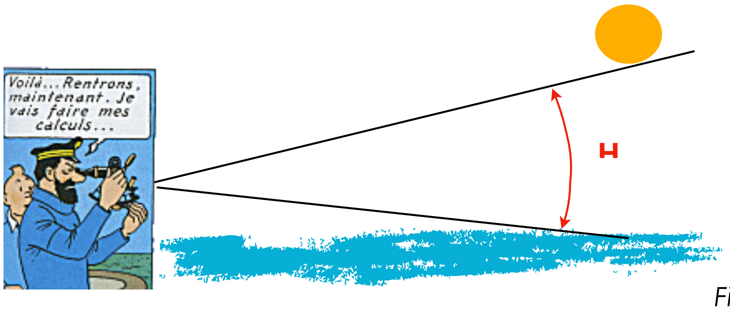


Figure 23

La distance angulaire du point A à Pg est facilement obtenue par : Dz = 90°-H. Nous savons maintenant que le point A est quelque part sur un petit cercle de la sphère terrestre. Tous les points situés sur ce cercle « voient » le soleil sous le même angle H. *Figure 24*

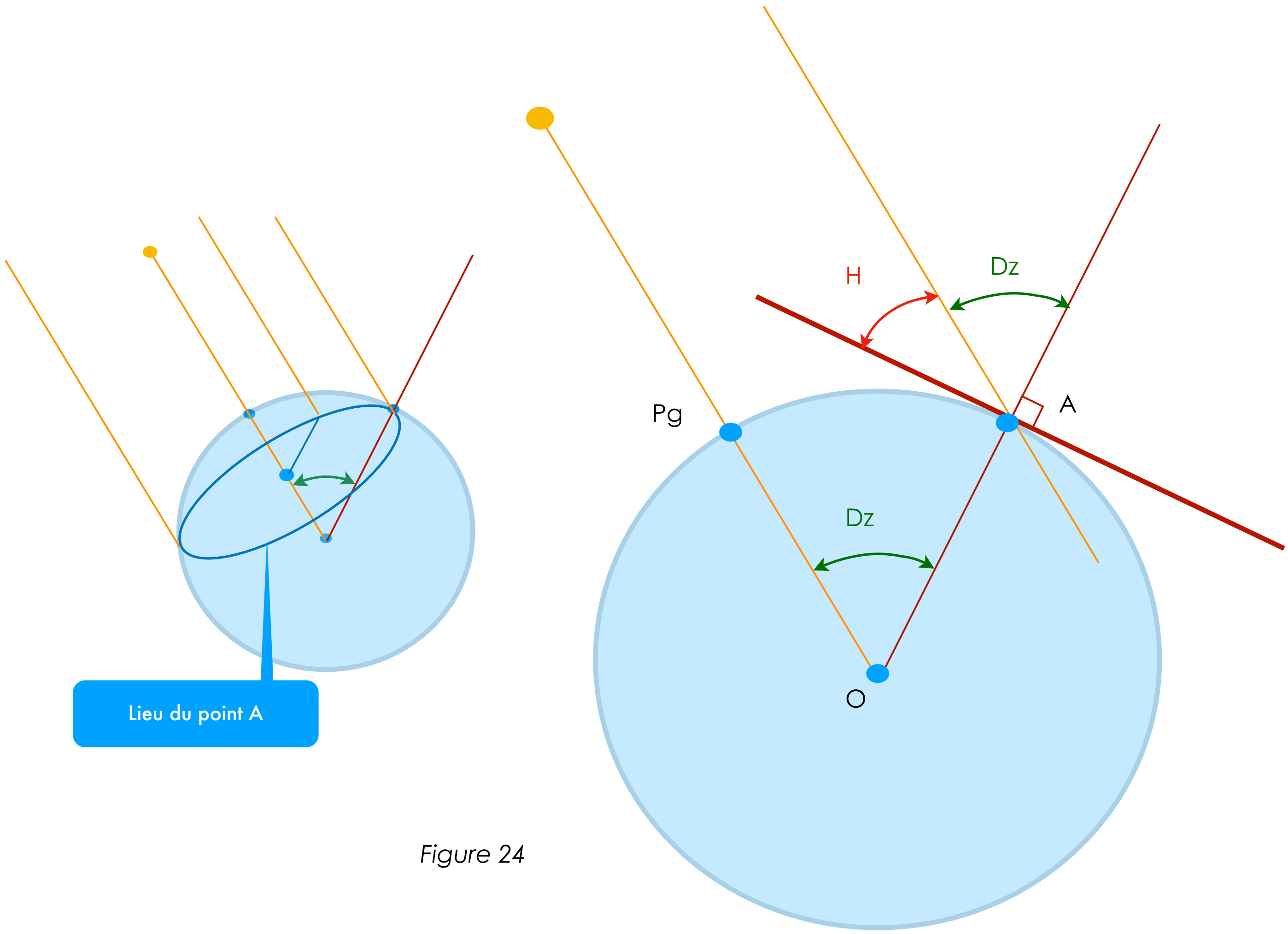


Figure 24

3.3 EXPLOITATION DES MESURES

Pour exploiter ces mesures et arriver au résultat attendu, notre position, plusieurs méthodes coexistent :

- Travailler avec un logiciel dédié ou un tableur intégrant les calculs, voire les éphémérides,
- Utiliser une calculette scientifique dotée d'un programme de navigation et des éphémérides,
- Utiliser une calculette scientifique banale, et avoir des éphémérides sous la main,
- Utiliser des tables de calcul (HO 249, tables de Dieumegard et Bataille).

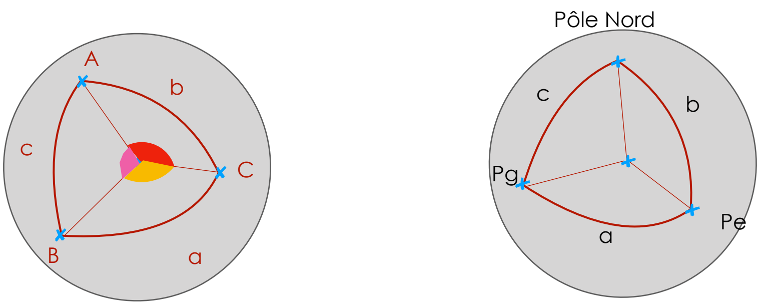
Toutes ces méthodes conduiront à la détermination de deux nouvelles grandeurs, **l'intercept** et **l'azimut** qui nous permettront de tracer une **droite de hauteur** sur la carte. Cette droite de hauteur sera la dernière étape avant d'arriver à destination !

Puisque nous manquons d'informations pour résoudre le problème, nous allons user d'un artifice en utilisant un point connu **Pe** en latitude et longitude (en général on choisit un point proche de notre position estimée, mais n'importe quel point ferait l'affaire). On va ensuite calculer l'écart de notre position par rapport à ce point, écart caractérisé par l'intercept et l'azimut.

3.3.1 Calcul de l'intercept

On se donne un point Pe, sa latitude Le et sa longitude Ge sont connues et on va calculer la hauteur Hc sous laquelle il verrait le Soleil au même instant que nous.

On a donc : Dze = 90°-Hc Dze représente la distance angulaire du point Pe à Pg. Nous avons donc un triangle sphérique constitué du pôle Nord de Pg et de Pe. *Figure 25*



cos a = cos b.cos c + sin b. sin c. cos A

Figure 25

Dze correspond à la longueur a. La longueur b est égale à (90°± Le). La longueur c est égale à (90°± D).

A correspond à l'angle horaire local en Pe, soit A = AHvge

- Si G est E : AHvge=AHvo+Ge
- Si G est W : AHvge = AHvo-Ge

Attention : Si le résultat est supérieur à 360°, lui retrancher 360° ; s'il est inférieur à 0, lui ajouter 360°

a- on choisit Pe dans l'hémisphère Nord

- b = 90°- Le,
- **Si D est Nord :** c = 90°- D

La formule des cosinus nous donne : cos a = cos b.cos c + sin b. sin c. cos A

cos Dze = cos (90°- Le).cos (90°-D)+ sin (90°- Le). sin (90°-D). cos AHvge

cos Dze = sin Le . Sin D+ cos Le. Cos D. cos AHvge

Comme : Dze = 90°-Hc, cos Dze =cos(90°-Hc)= sin Hc

Nous aurons alors : **sin Hc = sin Le.sinD + cos Le. Cos D. cos AHvge**

- **Si D est Sud :** c = 90°+D sin (90°+D) = sin (90°-D) = cos D

Les calculs donnent avec ces données : **sin Hc = - sin Le.sinD + cos Le. Cos D. cos AHvge**

b- on choisit Pe dans l'hémisphère Sud (à faire si vous allez naviguer plutôt dans le pacifique!)

- b = 90°+ Le,
- **Si D est Nord : sin Hc = - sin Le.sinD + cos Le. Cos D. cos AHvge**
- **Si D est Sud : sin Hc = sin Le.sinD + cos Le. Cos D. cos AHvge**

En résumé *Figure 26*:

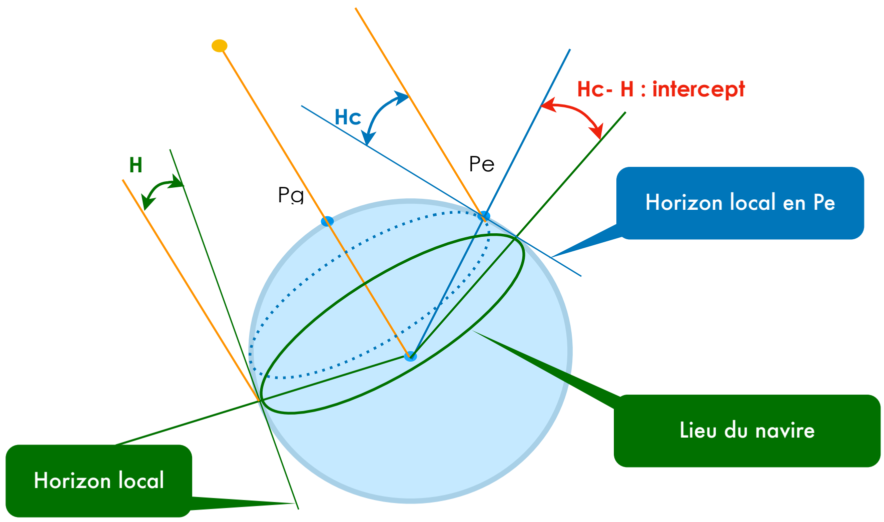


Figure 26

Pe Nord et D Nord ou Pe Sud et D Sud	Pe Nord, et D Sud ou Pe Sud et D Nord
sin Hc = sin Le.sinD + cos Le. Cos D. cos AHvge Hc = arcsin (sin Le.sinD + cos Le. Cos D. cos AHvge)	sin Hc = - sin Le.sinD + cos Le. Cos D. cos AHvge Hc = arcsin (- sin Le.sinD + cos Le. Cos D. cos AHvge)

Au point estimé Pe, nous « verrions » le soleil sous la hauteur **Hc**, hauteur calculée et nous serions sur un petit cercle passant par Pe. Or nous le voyons réellement sous la hauteur **H**, nous sommes donc sur un autre petit cercle distant du précédent de la longueur angulaire **Hc-H**. C'est cette quantité que l'on nomme **intercept**. Sur notre carte de dimensions limitées et faibles par rapport à celles de la sphère ce petit cercle sera représenté en partie par un arc de cercle, mais à l'échelle de notre carte cet arc sera assimilé à une droite.

C'est la **droite de hauteur**!

3.3.2 Calcul de l'azimut

Nous savons donc que nous sommes « pas loin » de Pe sur cette droite, mais nous ne savons pas quelle est l'orientation exacte de cette droite. Pour la connaitre nous allons maintenant chercher la direction du soleil, **l'azimut**. On pourrait très bien utiliser le compas de relèvement, mais cette mesure serait trop imprécise. On va calculer cette direction toujours à l'aide de notre formule des cosinus.

On retrouve notre triangle sphérique constitué des points Pg, Pe et du pôle Nord. Dans ce triangle sont connus : a = Dze = 90°-Hc b = 90°+ Le   c = 90°+ D

On peut donc calculer n'importe quel angle au sommet et en particulier celui noté **Z** qui nous donne la direction de Pg par rapport au méridien passant par Pe, c'est notre azimut. *Figure 27*

cos a = cos b.cos c + sin b. sin c. cos A

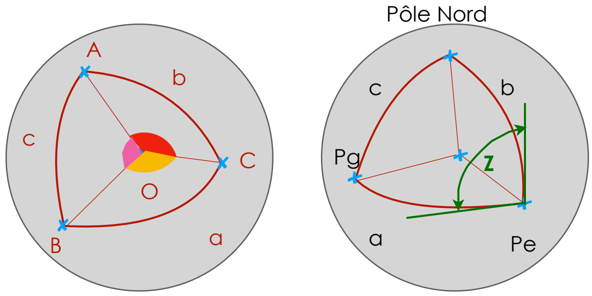


Figure 27

La formule des cosinus à utiliser est :

$$\cos c = \cos b.\cos a + \sin b.\sin a.\cos C$$

Soit :

$\cos(90° \pm D) = \cos(90° \pm Le).\cos(90°-Hc) + \sin(90° \pm Le).\sin(90°-Hc).\cos Z$

$\pm \sin D = \pm \sin Le.\sin Hc \pm \cos Le.\cos Hc.\cos Z$

L'orientation Nord ou sud de Le est à prendre en compte :

On choisit Pe dans l'hémisphère Nord, $\cos(90° \pm Le) = \cos(90°-Le) = \sin Le$ et $\sin(90° \pm Le) = \cos Le$

Un choix de Pe dans l'hémisphère sud conduit à : $\cos(90° \pm Le) = \cos(90°+Le) = -\sin Le$

Si la déclinaison est Nord, période allant de l'équinoxe de printemps à celle d'automne en passant par l'été :

$$\cos(90° \pm D) = \cos(90°-D) = \sin D$$

Si la déclinaison est Sud, période allant de l'équinoxe d'automne à celle de printemps en passant par l'hiver :

$$\cos(90° \pm D) = \cos(90°+D) = -\sin D$$

L'azimut est alors déterminé dans chacun des cas :

Pe choisi dans l'hémisphère Nord

Déclinaison Nord (navigations de printemps, été, automne)

$$\sin D = \sin Le.\sin Hc + \cos Le.\cos Hc.\cos Z$$

$$\cos Z = (\sin D - \sin le.\sin Hc) / \cos Hc.\cos Le$$

$$Z = \arccos((\sin D - \sin le.\sin Hc) / \cos Hc.\cos Le)$$

Déclinaison Sud (navigations d'automne, hiver jusqu'au printemps)

$$-\sin D = \sin Le.\sin Hc + \cos Le.\text{Cos } Hc.\cos Z$$

$$\text{Cos } Z = -(\sin D + \sin le.\sin Hc) / \cos Hc.\cos Le$$

$$Z = \arccos(-(\sin D - \sin le.\sin Hc) / \cos Hc.\cos Le)$$

Pe peut être choisi dans l'hémisphère SUD, on a alors :

Déclinaison Nord (navigations de printemps, été, automne)

$$\cos Z = (\sin D + \sin le.\sin Hc) / \cos Hc.\cos Le$$

$$Z = \arccos((\sin D + \sin le.\sin Hc) / \cos Hc.\cos Le)$$

Déclinaison Sud (navigations d'automne, hiver jusqu'au printemps)

$$\text{Cos } Z = (-\sin D + \sin le.\sin Hc) / \cos Hc.\cos Le$$

$$Z = \arccos((-\sin D + \sin le.\sin Hc) / \cos Hc.\cos Le)$$

Nous avons maintenant la direction de Pg par rapport au méridien passant par Pe, on peut donc localiser Pg grâce à l'azimut Z.

3.4 LA DROITE DE HAUTEUR ET LE POINT

3.4.1 Tracé de la droite de hauteur

A la table à carte on retrouve la règle Cras, le compas à pointe sèche, le crayon et la gomme.

Sur la carte on reporte Pe que l'on connait bien puisqu'on l'a choisi, il n'est pas utile d'y porter Pg. Pg est sûrement largement à l'extérieur de votre carte, inutile de chercher à le représenter, on s'en passe très bien.

On trace la droite passant par Pe et inclinée de Z par rapport au méridien de Pe. Cette droite vise Pg on la nomme par abus de langage azimut. Rappelons que l'intercept est la différence entre la hauteur calculée et la hauteur mesurée Hc-H.

Si le calcul nous fournit pour l'intercept un résultat positif Hc > H. La hauteur calculée est supérieure à la hauteur mesurée, le rayon du petit cercle passant par Pe est plus grand que celui sur lequel se trouve la position cherchée. *Figure 28*

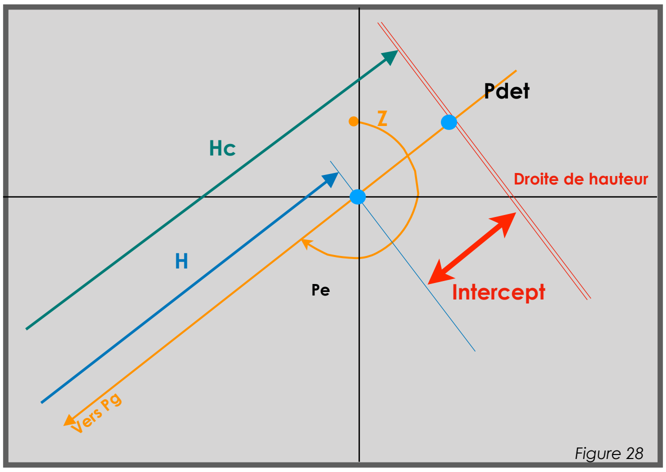


Figure 28

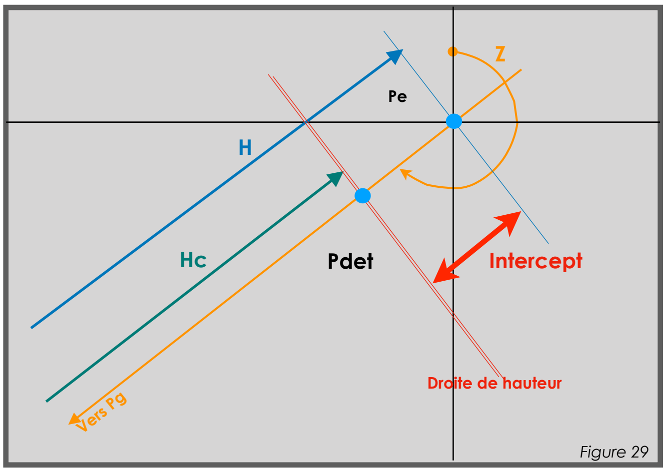


Figure 29

Si l'intercept est négatif, c'est le contraire le rayon du petit cercle passant par Pe est plus petit que celui sur lequel nous sommes. *Figure 29*

On reporte l'intercept sur l'azimut (dans le bon sens) et on obtient le point déterminatif Pdet.

La droite de hauteur est perpendiculaire à l'azimut en Pdet, nous serons situés sur celle-ci. Il est de tradition dans la marine française de la tracer avec un double trait.

3.4.2 Le point

Pour obtenir la position du navire, il faut une deuxième droite de hauteur sur laquelle on pense être situé. L'obtention de cette deuxième droite n'est pas instantanée, il faut faire une seconde mesure de hauteur quelques heures après et donc surveiller cap et distance parcourue entre les deux observations pour déplacer la première droite à l'heure de la seconde observation.

Cette deuxième droite peut être aussi :

- Le relèvement d'un amer identifié.
- Une droite de hauteur issue d'un second astre ou de la lune. Certains jours la lune est visible en même temps que le soleil.
- Une droite de hauteur issue d'une étoile….
- Une droite de hauteur tracée à la méridienne.

Au bout de ce parcours céleste, vous aurez votre position ! Inutile de dire que les GPS ont leurs avantages, mais ils ont quand même moins romantiques !

4 RESUME

4.1 DÉROULÉ DES OPÉRATIONS A EFFECTUER

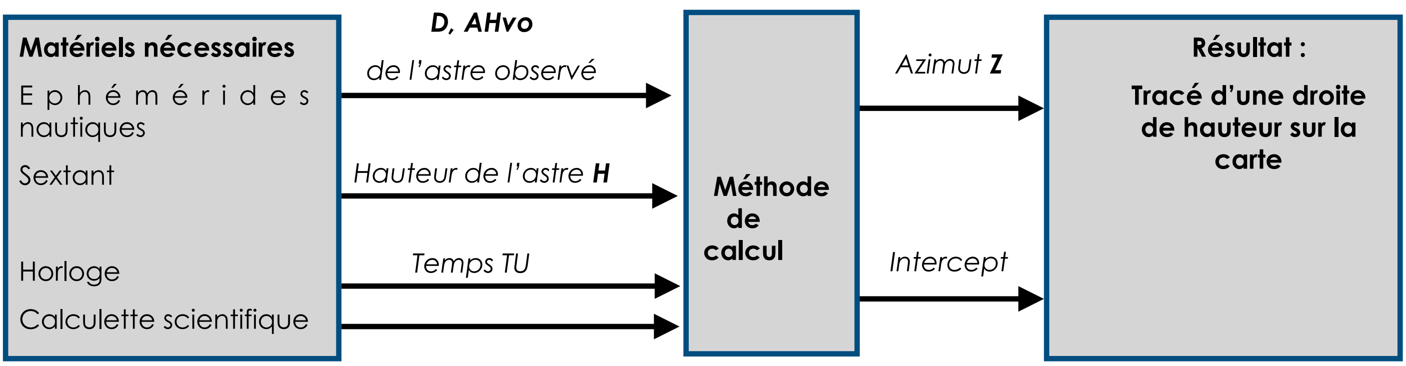


Figure 30

4.2 LES ÉTAPES DU CALCUL

1 Mesure de H au sextant et relevé de l'heure précise de la mesure : H, TU

2 Choix arbitraire d'un point de position estimée Pe : Ge, Le

3 Recherche dans les éphémérides de AHvo et D l'astre à TU

4 Calcul de la hauteur calculée : Hc = arcsin($\pm$ sin Le.sinD + cos Le. Cos D. cos AHvge)

5 Calcul de l'intercept : Hc-H

6 Calcul de l'azimut Z : Z = arccos ((sin D-sin le. sinHc)/ cos Hc.cos Le)

7 Tracé de la droite sur la carte.

4.3 LES MOYENS DE CALCUL

Plusieurs moyens de calcul sont à notre disposition, certains sont issus d'un remps où les calculettes n'existaient pas et paraissent à l'époque d'internet complètement obsolètes.

Tables de calcul : à l'époque où le navigateur ne pouvait faire que des additions et des soustractions, ont été étudiées et déterminées des tables de calculs où les formules étaient pré-calculées en laissant des opérations simples au navigateur. Les Français **Dieumegard** et **Bataille** ont crée des tables qui portent, leur noms et que l'on peut encore trouver. Les américains ont les leurs, les **tables HO249** qui sont aussi encore en vente. Dans ce cahier nous ne les présenterons pas.

Calculette avec programme intégré : certaines calculettes scientifiques ont été développées avec des programmes de navigation intégrant les éphémérides, par exemple la calculette Casio XXXXXX.

Calculette sans programme de navigation astronomique : il est possible d'utiliser une calculette scientifique programmable ou non pour effectuer les calculs, mais dans ce cas il faut avoir les éphémérides nautiques à sa disposition.

Logiciel sur PC ou applications sur smartphone : tous ces produits existent sur le net et sont relativement faciles à trouver, beaucoup sont en anglais, certains sont gratuits, d'autres payants….

5 LA POSITION À LA MÉRIDIENNE

Nous allons utiliser le Soleil comme astre d'observation, mais les développements faits ici sont théoriquement applicables à d'autres étoiles ou la lune…..sauf qu'il faut les voir pour pouvoir relever leur hauteur sur l'horizon!

5.1 ZENITH ET MÉRIDIENNE D'UN LIEU

Le zénith d'un lieu correspond à la verticale de ce lieu. Si un astre **S** est au zénith d'un lieu, il est situé sur la droite reliant le centre de la Terre **O** et le point d'observation **M**. *Figure 31*

Si S est au zénith de M, sa hauteur est alors de 90 °.

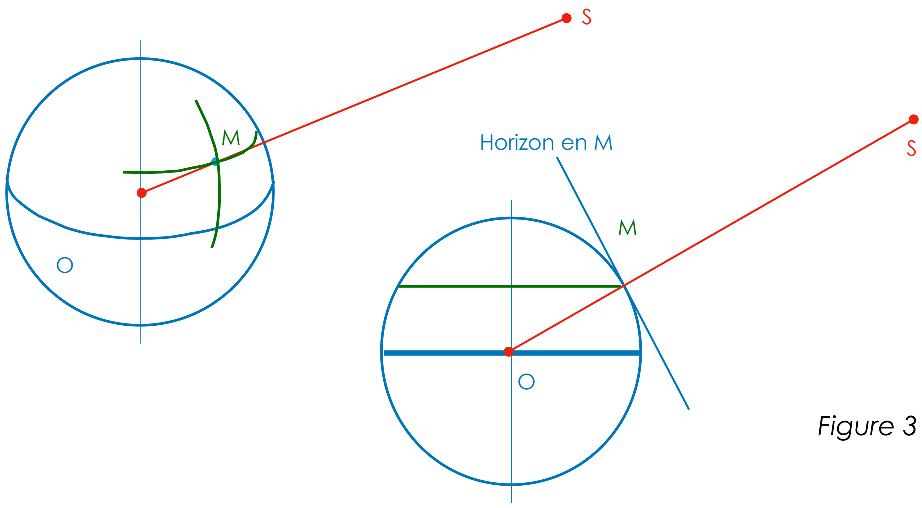


Figure 31

On parle de **méridienne** lorsque l'astre passe exactement dans le plan du méridien de M. *Figure 32*

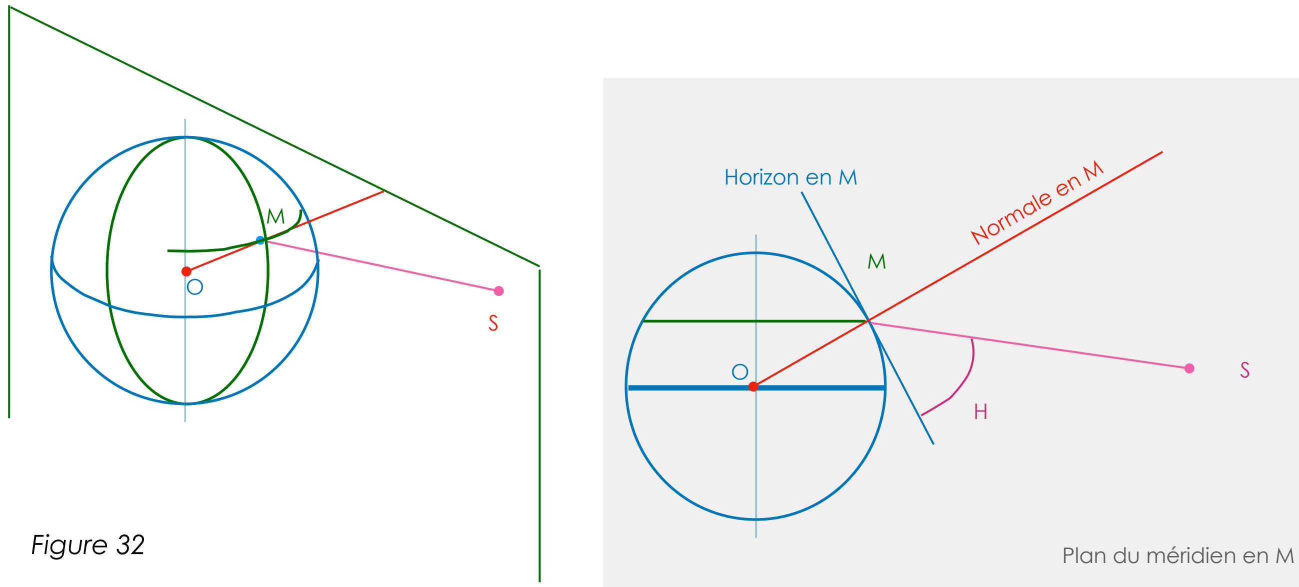


Figure 32

C'est un instant particulier, qui ne se produit qu'une fois par jour pour tous les astres. Pour le soleil c'est aux alentours de midi (local).

5.2 TROPIQUES, DÉCLINAISON ET AZIMUT

Comme on l'a vu la déclinaison du soleil varie au cours des saisons entre 23,44° Nord et 23,44° Sud. Elle ne peut sortir de cet intervalle.

Aux solstices cette déclinaison est maximale. Les points de la Terre situés sur les petits cercles passant par les points C1 et C2, verront le soleil, au solstice, sous cette déclinaison maximale. Ces deux cercles définissent les tropiques, **tropique du cancer** dans l'hémisphère Nord et **tropique du capricorne** dans l'hémisphère Sud. *Figure 33*

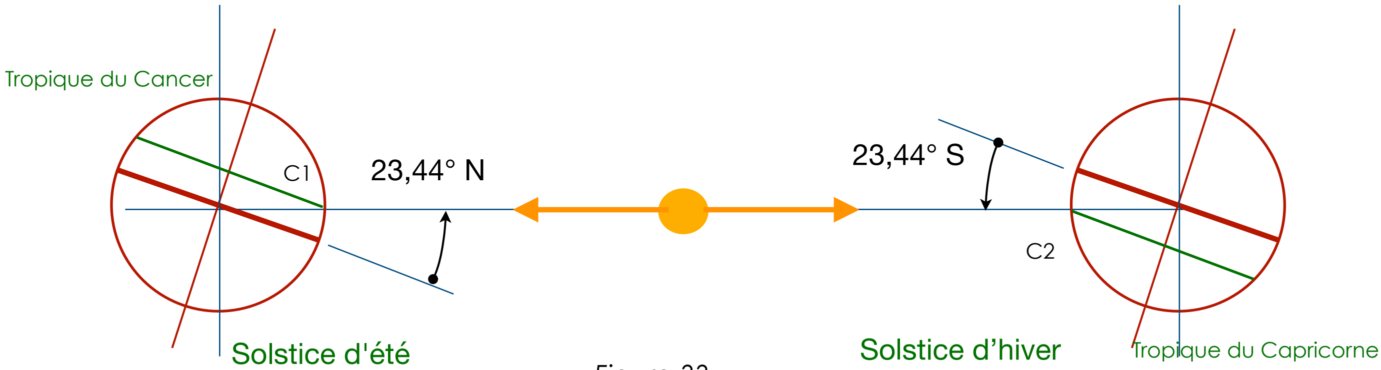


Figure 33

On voit que tous les points situés dans l'hémisphère Nord et au dessus du tropique du Cancer verront le soleil toujours dans le Sud, alors que les points de l'hémisphère Sud en dessous du tropique du Capricorne verront le soleil dans le Nord.

Pour nous, en France l'azimut du soleil à la méridienne sera toujours le SUD, c'est-à-dire 180°.

Les points de la zone tropicale située entre les deux tropiques verront le soleil dans le Nord ou le Sud suivant les saisons.

5.3 CULMINATION

5.3.1 Définition

Lorsque le soleil est à la méridienne il atteint sa **hauteur maximale**, il **culmine**. Par l'observation de sa hauteur on pourra déterminer l'horaire de cette culmination. *Figure 34*

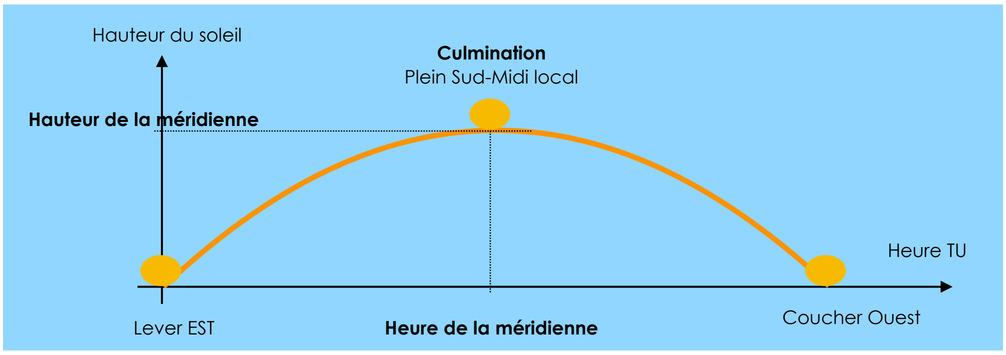


Figure 34

5.3.2 Mise en évidence de la culmination

La hauteur **H** de l'astre est calculée par la relation: H = 90°-Dz, où Dz est la distance zénithale, distance (angulaire) entre Pg et le point M. *Figure 35*

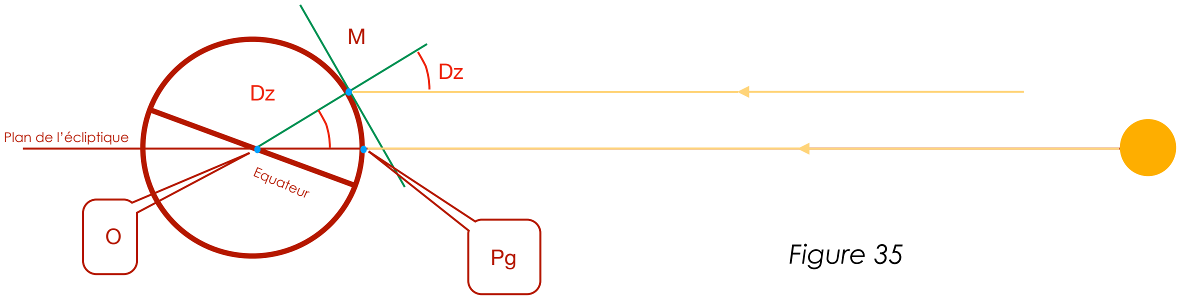


Figure 35

La Figure 36 représente la configuration à la méridienne, le soleil est dans le plan du méridien passant par le point, Pg appartient aussi à ce plan, la distance zénithale est DZ. Un peu avant la méridienne, le point M occupe la position M1 sur le même parallèle, sa latitude est constante, c'est la rotation d ela Terre qui le fait passer de M1 à M. La distance zénithale en M1 est DZ1. *Figure 36*

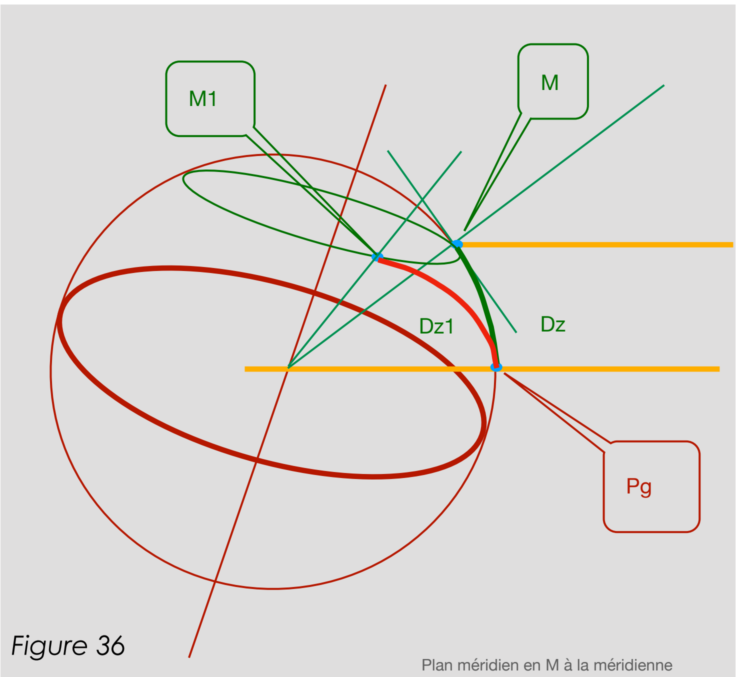


Figure 36

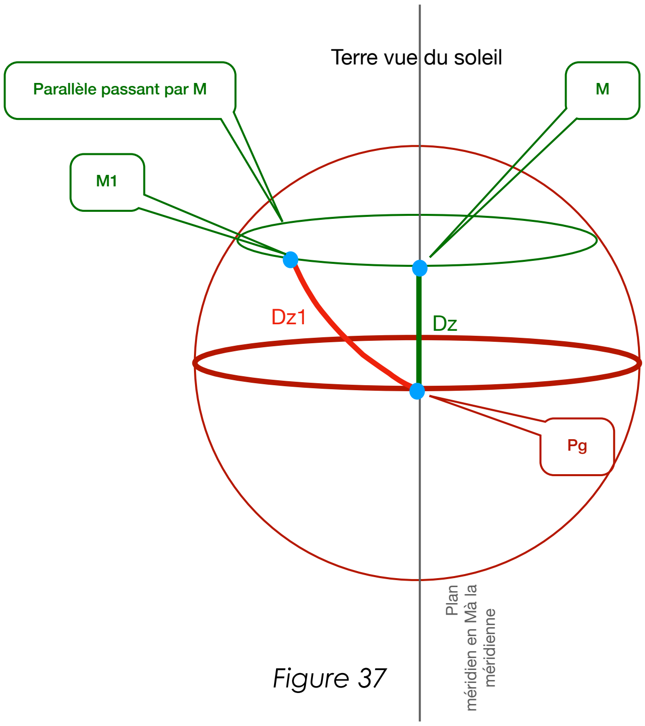


Figure 37

Si on observe la Terre vue du Soleil (il suffit de s'y transporter et d'écarquiller les yeux, rien de plus facile), on obtient la configuration de la Figure 37 et on constate que la distance zénithale Dz1 est supérieure à Dz. A la méridienne la distance zénithale est minimale. Comme H = 90°-Dz, si Dz est minimale, H sera maximale.

La hauteur du soleil à la méridienne est maximale, d'où le terme de culmination.

5.4 LA POSITION À LA MÉRIDIENNE

A la méridienne la configuration géométrique simplifie les calculs. En effet, à cet instant le méridien de l'observateur et celui du soleil sont confondus, l'angle horaire local **AHvg** est nul et l'azimut **Z** est connu, Sud ou 180° pour nous.

AHvg = 0 Z = 180°

5.4.1 La latitude à la Méridienne

La latitude à la méridienne n'est qu'une Droite de Hauteur particulière. L'azimut étant confondu avec le méridien, cette droite de hauteur correspond au parallèle du navire. Elle est facile à tracer (c'est une horizontale sur la carte) et on peut la combiner avec une Droite de Hauteur "normale" pour obtenir un point. A ce titre, il est donc très intéressant de la connaître.

a - La visée :
Environ 10 minutes avant l'heure estimée de la culmination, avec votre sextant faites un premier relevé de hauteur. Inutile de s'occuper de l'heure à ce moment.
Sans dérégler votre sextant, quelques minutes plus tard visez de nouveau le soleil. Il aura un peu monté au-dessus de l'horizon, refaites la mesure de hauteur.
Refaites plusieurs fois cette procédure, tant que le soleil monte. A un moment donné, le soleil ne va plus monter. Ne modifiez plus votre sextant : la dernière mesure qu'il indique est celle de la hauteur à la culmination. Notez alors l'heure TU approximative (même à un quart d'heure près, c'est suffisant).

b- Les calculs :
Corrigez la hauteur instrumentale[2] pour obtenir la hauteur vraie :

Hauteur vraie = Hauteur instrumentale – collimation ± corrections

c-Calculez la distance zénithale. *Figure 38*

C'est l'angle qui vous sépare du point Pg du soleil. Elle est égale à 90° – Hauteur vraie.

Si vous tourniez le dos à Nord lors de vos mesures, la distance zénithale est positive.

Si vous tourniez le dos à Sud, elle est négative.
Astuce : pour vous faciliter cette soustraction, remplacez 90° par 89°60

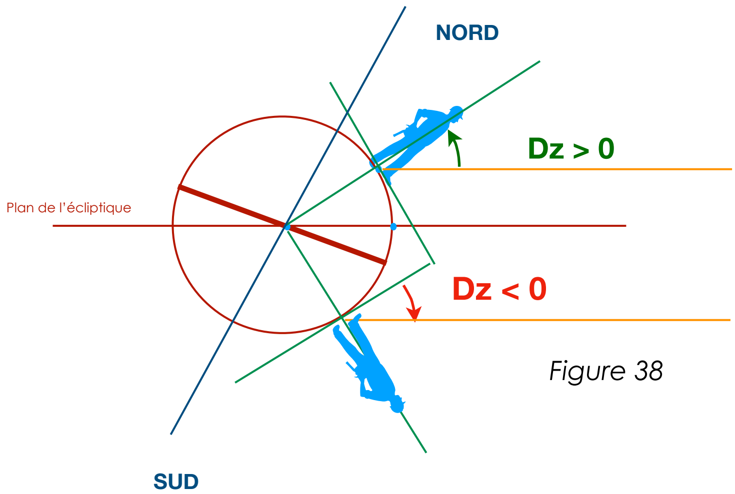


Figure 38

d-Cherchez la déclinaison du soleil dans vos éphémérides nautiques, pour l'heure TU de la mesure.

Si cette déclinaison est **Nord**, elle est **positive**. Si elle est **Sud**, elle est **négative**. Notez que la déclinaison variant très lentement, il n'est pas absolument nécessaire de connaître l'heure exacte de la culmination pour calculer la latitude. C'est d'ailleurs pour cela que cette mesure peut être pratiquée même sans chronomètre.

Votre latitude vaut alors :

Latitude = Distance zénithale + Déclinaison du soleil

Si le résultat est positif, votre latitude est Nord ; s'il est négatif, votre latitude est Sud.

---

[2] Ces termes seront développés lors de l'étude du sextant

5.4.2 La longitude à la Méridienne

Autant le calcul de la latitude à la méridienne que nous venons de voir ci-dessus est facile et utile, autant celui de la longitude est plus fastidieux et imprécis.
Il est beaucoup moins pratiqué, aussi nous ne le présenterons pas ici.

5.4.3 Détermination de l'heure approximative de la culmination

La culmination n'ayant lieu qu'une fois par jour, il ne faut pas la rater sinon tout est remis au lendemain. C'est pourquoi dès le matin il faut en pré-calculer approximativement l'heure. Pour cela il faut prévoir quelle sera votre longitude G vers midi local.

On peut sans inconvénient arrondir cette longitude estimée au degré inférieur si elle est Ouest, ou au degré supérieur si elle est Est. Même une erreur de 1° de longitude ne donne qu'une différence de 4 minutes de temps.

Dans les éphémérides, trouvez T.pass qui est l'heure TU de passage du soleil au méridien de Greenwich pour le jour considéré. Figure 22, page 15

Convertissez votre longitude estimée en temps en la divisant par 15 (G / 15) ou en utilisant la table XIb située à la fin des Ephémérides.

Puis calculez l'heure estimée de la culmination :

Si G est Ouest, vous ajouterez G/15 à T.pass : H.culm. = T.pass + (G / 15)

Si G est Est, vous soustrairez G/15 à T.pass : H.culm. = T.pass – (G / 15)

Nota : Il n'est pas nécessaire de refaire ce calcul tous les jours, en effet d'un jour au suivant, l'heure de la méridienne sera à peu près la même. On peut donc prendre l'heure de la méridienne de la veille comme heure approximative de celle du jour.

5.4.4 Exemple de position à la méridienne

Vous naviguez en Manche un 15 Aout 2025, il est 8 h du matin (heure locale) et vous savez que vous êtes passés devant Cherbourg dans la nuit. Sur la carte vous évaluez votre longitude à **G = 1**°.(arrondie au degré inférieur puisque G est ouest.

L'esprit clair grâce au café chaud que vous venez de boire, vous décidez d'évaluer l'heure d de la méridienne pour ne pas la louper.

La page des éphémérides du 15 aout 2025 est reproduite Figure 39

Éphémérides nautiques 2025	Vendredi 15 Août

Soleil					
Heure U.T.	AHvo		Déclinaison		
h	°	'	°	'	
O	178	51,7	14	2,0	N
1	193	51,8		1,2	
2	208	52,0		0,4	
3	223	52,1	13	59,6	
4	238	52,2		58,8	
5	253	52.3		58.0	

Passage au méridien

12 h 4 m 27 s U.T.

Lat.	crépuscule				lever	
	h	m	h	m	h	m
52° N	3	18	4	7	4	45
50° N	3	29	4	14	4	50
45° N	3	51	4	30	5	2

Point vernal		
Heure U.T.	AHso	
h	°	'
O	323	39,4
1	338	41,9
2	353	44,3
3	8	46,8
4	23	49,3
5	38	51.7

Figure 39

Vous notez le temps de passage au méridien : **T pass = 12h 04 m27 s**

G est ouest, l'heure de culmination est donnée par : **Hculm = Tpass+G/15**

Soit : Hculm = 12h 04 min 27 s + 1/15 = 12h 04 min 27 s + 1/15 = 12h 04 min27 s + 4 min = **12h 08 m27 s**. Vous avez donc quelques heures devant vous pour vous préparer.

Soucieux de ne pas manquer ce rendez-vous, vous vérifiez vos heures.

L'heure de culmination que vous venez de calculer est exprimée en TU, votre montre est calée sur l'heure locale en vigueur en France comme l'horloge de la table à cartes. Nous sommes en été, donc l'heure locale est décalée de 2 heures par rapport au temps TU : heure légale été = TU + 2H.

La culmination aura donc lieu à : **12h 08 m27 s TU ou 14h 08 m27 s heure locale**, donc juste après le café !

Ce 15 aout, vous mesurez au sextant la culmination du soleil à une hauteur de **H = 53°45'** vers **12 h 07 min** TU, vers le sud.

Vous êtes à une hauteur de 2m. Votre sextant a une erreur de collimation de -3'. Grâce à la table des corrections de votre sextant, vous déterminez que la correction est de +12,2'. La hauteur vraie **Hv** est donc de 53°45' -(-3') + 12,2' = 54° 0,2'. **Hv = 54° 0,2'**

La distance zénithale **Dz** est alors de 89°60' – 54° 0,2' = 35° 59,8', arrondie à 36° 11'. Vous tourniez le dos à nord, donc elle est positive.

Dz = 35° 59,8'

Grâce aux éphémérides, vous déterminez la déclinaison pour le 15/08/2025 à 12h08min : N 13°51,6'. Elle est nord, donc positive.

D = + 13° 51,6'

Votre latitude est alors : L = Dz + D soit

L = 35° 59,8' +13° 51,6'

L = 49 ° 51,4'

Elle est positive, donc Nord. **L = 49 ° 51,4' N**

Soucieux de vérifier vos calculs, vous regardez votre traceur qui vous donne votre position : 49°50,7' N , 01°03,45 W.

Votre calcul vous donne un écart en latitude de :

49 ° 51,4'**-** 49°50,7' = 0,7' soit 0,7 mile nautique.

Epuisé par vos calculs, vous vous réconfortez en sachant que c'est bien devant Cherbourg que vous êtes passés cette nuit !

Soleil

Heure U.T.	AHvo		Déclinaison		
h	°	'	°	'	
O	178	51,7	14	2,0	N
1	193	51,8		1,2	
2	208	52,0		0,4	
3	223	52,1	13	59,6	
4	238	52,2		58,8	
5	253	52,3		58,0	
6	268	52,5	13	57,3	N
7	283	52,6		56,5	
8	298	52,7		55,7	
9	313	52,8		54,9	
10	328	53,0		54,1	
11	343	53,1		53,3	
12	358	53,2	13	52,6	N
13	13	53,3		51,8	
14	28	53,5		51,0	
15	43	53,6		50,2	
16	58	53,7		49,4	
17	73	53,8		48,6	
18	88	54,0	13	47,8	N
19	103	54,1		47,1	
20	118	54,2		46,3	
21	133	54,3		45,5	
22	148	54,5		44,7	
23	163	54,6		43,9	
24	178	54,7	13	43,1	N
	v =	0,1'	d =	-0,8'	
	1/2 Diam. =	*15,79'*			