

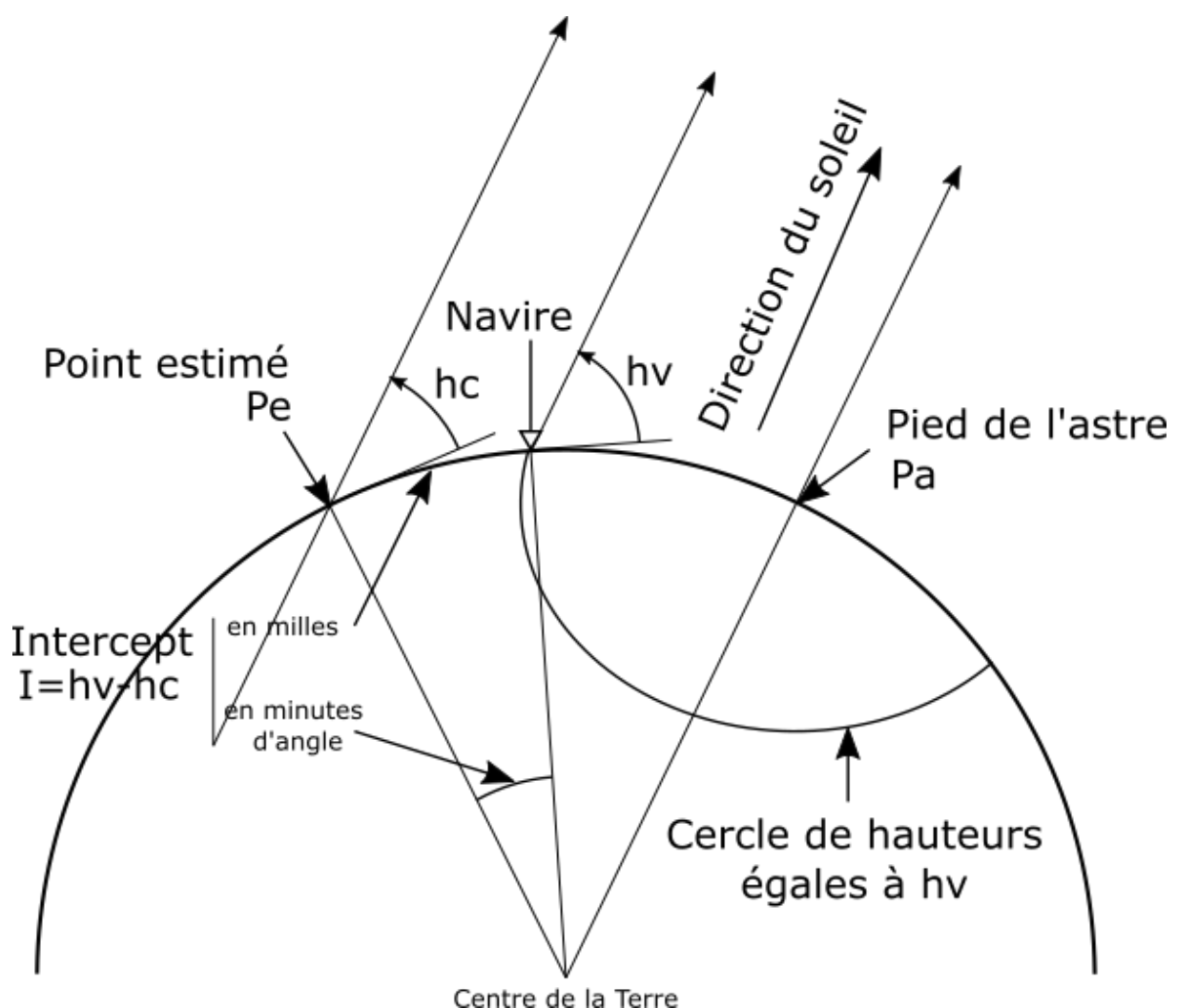
Point astronomique - Méthode de la droite de hauteur de soleil

1 - Principe de la méthode

La hauteur vraie du Soleil, notée h_v , est l'angle entre l'horizon et la direction du Soleil. Cette hauteur est mesurée à l'aide du sextant.

L'ensemble des points de la surface terrestre d'où l'on voit le soleil à une même hauteur h_v est un cercle, le "cercle de hauteurs égales", dont le centre se trouve sur la ligne joignant les centres respectifs de la Terre et du Soleil.

Le cercle de hauteurs égales à h_v ayant un rayon très important, on peut assimiler la portion de ce cercle située au voisinage de la position du navire à un segment de droite, la tangente à ce cercle, d'où le nom de droite de hauteur donné à la méthode.



La ligne joignant les centres respectifs de la Terre et du Soleil coupe la surface terrestre en un point Pa, souvent nommé "pied de l'astre" dont les coordonnées sont données par les éphémérides.

Connaissant la hauteur du Soleil, il serait simple de calculer la distance en milles séparant le navire du point Pa, pied de l'astre. Mais cette distance est en général très importante (plusieurs centaines ou milliers de milles) et le report sur une même carte impossible.

Il est beaucoup plus pratique de procéder par différence entre un point estimé et la position réelle du navire.

C'est la méthode de la droite de hauteur qui est utilisée dans ce but.

Cette méthode donne le correctif à apporter, à partir du point estimé, pour tracer une droite sur laquelle se trouve le navire. Ce correctif est nommé intercept.

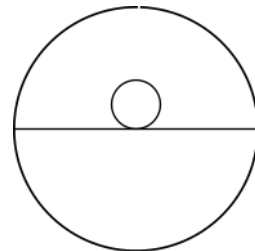
Le point estimé peut être déterminé par la navigation à l'estime à partir du dernier point astronomique par exemple.

2 - Observation au sextant

2 - 1 - mettre les filtres en place pour protéger la vue

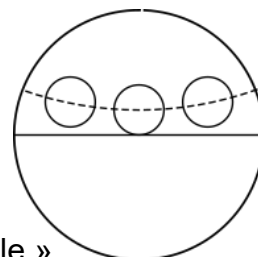
2 - 2 - régler, très approximativement, l'alidade sur la hauteur du soleil estimée

2 - 3 - tout en visant l'horizon, amener l'image du Soleil à tangenter l'horizon : bord inférieur du Soleil sur la ligne d'horizon.

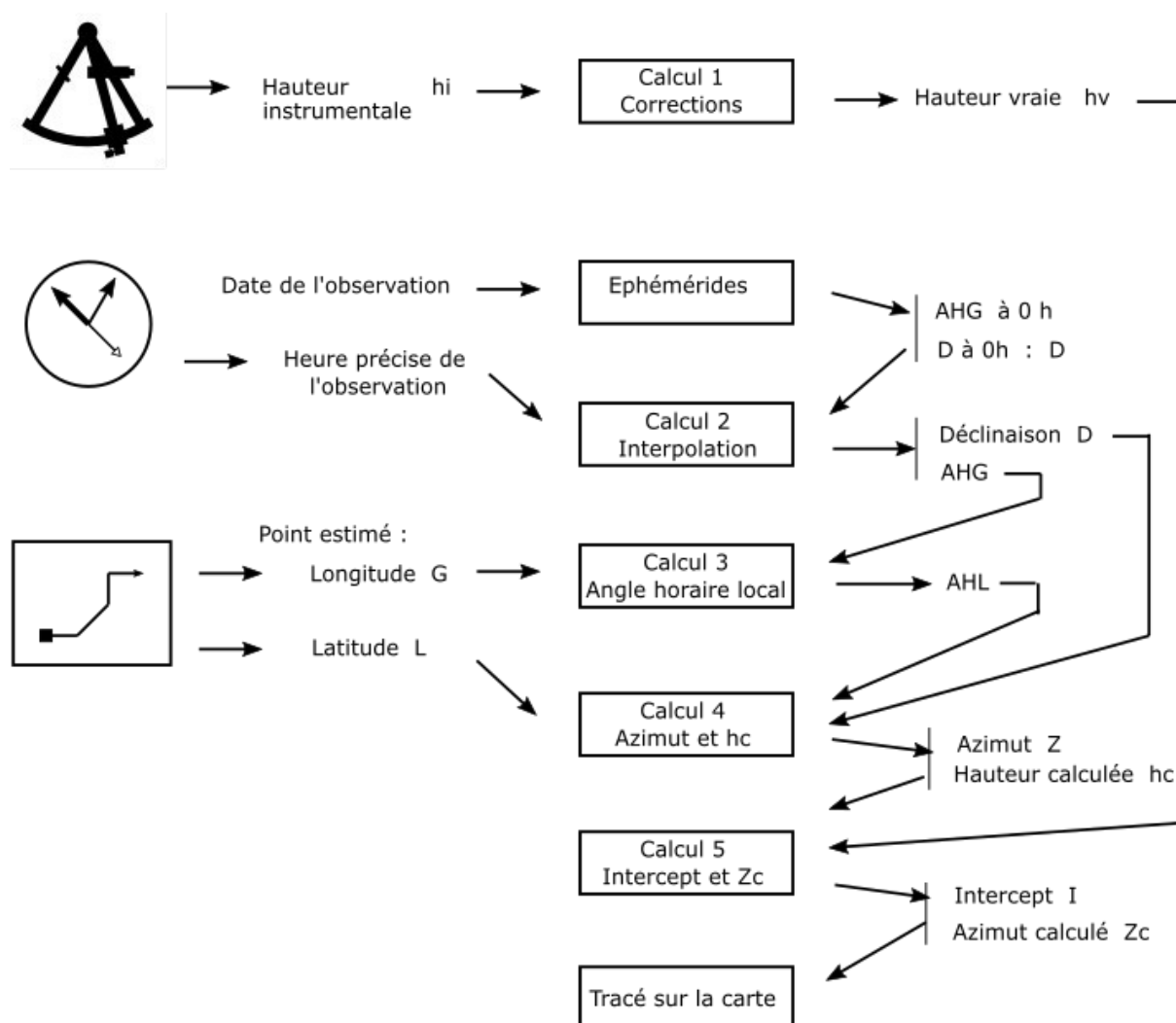


2 - 4 - faire tourner le sextant autour de son axe optique dans un mouvement de balancement pour s'assurer que l'image du bord inférieur du Soleil est, au point le plus bas de sa course, exactement sur la ligne d'horizon.

Noter immédiatement l'heure en commençant par les secondes, et la hauteur mesurée, dite « hauteur instrumentale ».



3 - Schéma des calculs de droite de hauteur de Soleil



Informations complémentaires sur les calculs ci-dessus :

3 - 1 - Calcul 1 - Corrections pour déterminer la hauteur vraie h_v

La hauteur instrumentale, celle qui est lue sur le sextant, doit être corrigée pour obtenir la hauteur vraie h_v .

Les corrections à apporter sont les suivantes :

Collimation

Il arrive que les miroirs du sextant ne soient pas parfaitement réglés. On peut mesurer l'erreur en réglant l'alidade sur 0° et en visant l'horizon. S'il y a un décalage

en hauteur entre l'horizon vu directement à travers la partie gauche, non réfléchissante, du petit miroir et l'image de l'horizon réfléchi par les deux miroirs et vue à droite, modifier le réglage de l'angle jusqu'à ce que les deux images de l'horizon soient au même niveau, et lire la valeur de l'angle correspondant.

Cette valeur, en inversant le signe, est la première correction à apporter à la mesure lue sur le sextant. Elle est nommée collimation.

exemple : si pour aligner les deux parties de l'horizon, on doit régler le sextant sur +2 minutes, cela signifie que le sextant majore l'angle mesuré de 2 minutes, et qu'il faudra donc diminuer la hauteur indiquée de 2 minutes : collimation = - 2 '.

3 - 2 - Corrections groupées dans la table "1ère correction"

Ce tableau donne directement, sous forme de minutes d'angle à ajouter, la somme des corrections à apporter en raison des quatre erreurs suivantes :

- sur le navire, l'observateur n'est pas au niveau de la mer, mais à une hauteur H au dessus de ce niveau
- pour obtenir une meilleure précision de lecture sur le sextant, ce n'est pas le centre du Soleil que l'on amène sur l'horizon, mais son bord inférieur. La différence est de 16 minutes d'angle.
- la mesure n'est pas faite au centre de la Terre, mais à la surface de celle-ci, d'où une erreur de parallaxe à corriger
- les rayons du Soleil sont déviés en traversant les différentes couches de l'atmosphère terrestre, d'où une correction de réfraction

Correction calendaire donnée par la table "2ème correction"

Celle-ci donne une correction à apporter en fonction du mois dans l'année.

Les deux tables ci-dessus se trouvent dans toutes les éphémérides nautiques.

Exemple

Le 19/09/2023, à 09h 57 min 46 sec T.U., au large des côtes de Bretagne Sud, on relève une hauteur du Soleil de 35° 48'.

La collimation du sextant a été mesurée : - 2 minutes

L'observateur est à 2,5 m au dessus du niveau de la mer

Point estimé : Latitude = 47° 26,1 ' Nord Longitude = 3° 52,9 ' Ouest

	Degrés	Minutes
Hauteur instrumentale lue sur le sextant	35	48
Collimation		-2
1ère correction (définie ci-dessus)		+12
2ème correction (septembre)		-0.1
Total des corrections		9,9
Hauteur vraie	35	57,9

NB La table de 1ère correction indique une correction de +12 ' pour une hauteur de l'observateur de 2,5 m et une hauteur de Soleil voisine de 36°

3 - 3 - Ephémérides

Pour les calculs qui vont suivre, il est nécessaire de connaître la position du Soleil, plus précisément celle du point Pa, pied de l'astre, à l'instant de l'observation.

Les éphémérides du Soleil fournissent cette position, mais à 0 h, sous la forme de deux coordonnées :

- la déclinaison D, qui est la latitude du point Pa, c'est à dire l'angle entre l'équateur et le point Pa, dans le plan du méridien du Soleil, et le sens de cet angle : + vers le Nord, - vers le Sud.
- l'angle horaire, qui est la longitude du point Pa, c'est à dire l'angle entre le méridien d'origine (méridien de Greenwich, de longitude 0), et le méridien du Soleil.
Le nom de variable utilisé pour désigner cet angle varie selon les pays et les éphémérides :
 - AHv0 : Ephémérides du Bureau des longitudes ou Almanach du marin breton
 - AHG: comme Angle Horaire Greenwich, notation utilisée ci-dessous
 - GHA dans les tables anglaises

NB. Il s'agit de l'angle horaire du Soleil vrai et pas celui du Soleil moyen. Il n'est donc en général pas exactement égal à 180° à 0h. La différence entre ces deux valeurs est nommée « équation du temps ».

3 - 4 - Calcul 2 - Interpolation

Les éphémérides donnent l'angle horaire et la déclinaison à 0h pour chaque jour de l'année.

Leurs variations en 24 h sont donc connues et on procède par interpolation linéaire, (règle de trois) pour connaître ces valeurs à l'instant précis de l'observation. Il faut convertir l'heure de l'observation en heure centésimale afin de pouvoir procéder aux interpolations.

Exemple : $9\text{h } 57\text{min } 46\text{sec} = 9 + 57/60 + 46/3600 = 9,962777778 \text{ h.}$

Une conversion analogue doit également être effectuée pour les angles.

Principe des interpolations : les variations respectives de AHG et D en 24 h étant connues, une règle de trois permet de déterminer les variations pour 9,962777778 h.

Exemple : Lecture dans les éphémérides de 2023

le 19/09 à 0h. AHG = $181^\circ 29,2'$ ($181,4866667^\circ$) D = $1^\circ 39,9'$ Nord

le 20/09 à 0h. AHG = $181^\circ 34,5'$ ($181,575^\circ$) D = $1^\circ 16,6'$ Nord

AHG à l'heure de l'observation se calcule ainsi :

$$\text{AHG} = 181,4866667 + (360 - 181,4866667 + 181,575) \times 9,962777778 / 24$$

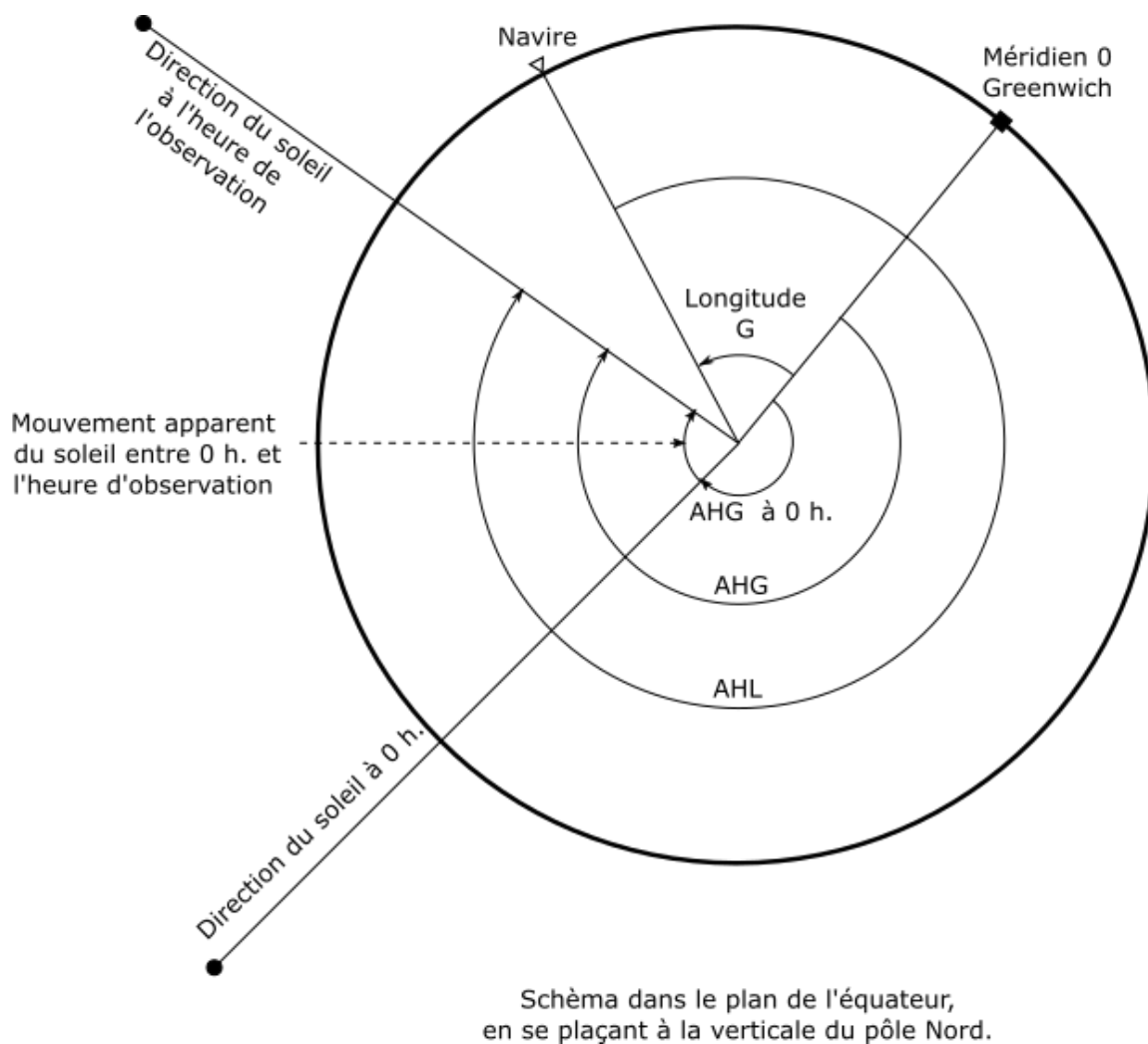
Voir sur la feuille de calcul le résultat de deux interpolations :

- AHG à l'heure de l'observation : $330,9650019^\circ$ soit $330^\circ 57,9'$
- Déclinaison D à l'heure de l'observation : $+ 1,503796721^\circ$

3 - 5 - Calcul 3 - Angle horaire local - AHL

L'angle horaire local est l'angle entre le méridien du soleil et celui du navire :

$AHL = AHG + G$ avec la longitude G algébrique ($G > 0$ si Est, $G < 0$ si Ouest) (1)



Dans l'exemple joint, la longitude du point estimé est à l'Ouest, donc négative :

$G = 3^{\circ} 52,9'$ Ouest soit $-3,881666667$

Donc $AHL = AHG + G = 330,96500019 - 3,881666667 = 327,0833352$ ($327^{\circ} 5'$)

(1) La convention de signe de la longitude ($G > 0$ si Est, $G < 0$ si Ouest) correspond à la norme ISO 6709.

Cependant, de nombreux marins utilisent encore une convention inverse. Dans ce cas, il suffit d'utiliser la formule $AHL = AHG - G$. Le résultat sera identique.

D'autres navigateurs calculent de la façon suivante, sans donner un signe à G :

$AHL = AHG - G$ si longitude à l'Ouest ou $AHL = AHG + G$ si longitude à l'Est

Ces trois présentations donnent exactement le même résultat pour AHL.

3 - 6 - Calcul 4 - Hauteur calculée et Azimut du Soleil au point estimé Pe

Ces valeurs sont obtenues par les formules suivantes, données pour information :

$$hc = \text{Arc sin} (\sin(L) \times \sin(D) + \cos(L) \times \cos(D) \times \cos(AHL))$$

$$Z = \text{Arc cos} ((\sin(D) - \sin(L) \times \sin(hc)) / \cos(L) \times \cos(hc))$$

puis $Zc = 360 - Z$ si $0 \leq AHL < 180^\circ$ (quand le Soleil est à l'Ouest)
ou $Zc = Z$ si $180 \leq AHL < 360^\circ$ (quand le Soleil est à l'Est)

Voir les résultats sur la feuille de calcul jointe en annexe.

3 - 7 - Calcul 5 - Intercept

Comme indiqué en introduction, on procède par différence entre :

- le point estimé Pe, dont les coordonnées (latitude L et longitude G) sont connues. Pour ce point, les calculs ci-dessus ont permis de déterminer la hauteur hc et l'azimut Zc du Soleil.

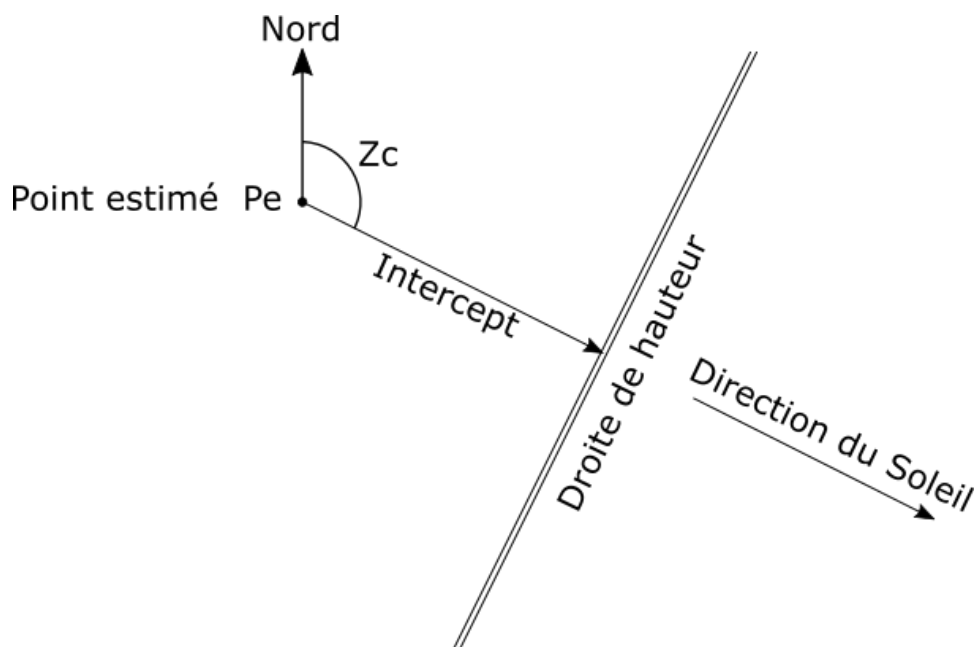
- le point réel du navire, dont on cherche les coordonnées, et pour lequel on connaît la hauteur vraie du soleil, hv, relevée au sextant.

La différence $I = hv - hc$ est nommée intercept et sa valeur, exprimée en minutes d'angle, donne directement la distance en milles qui sépare le point estimé de la droite de hauteur sur laquelle se trouve le navire.

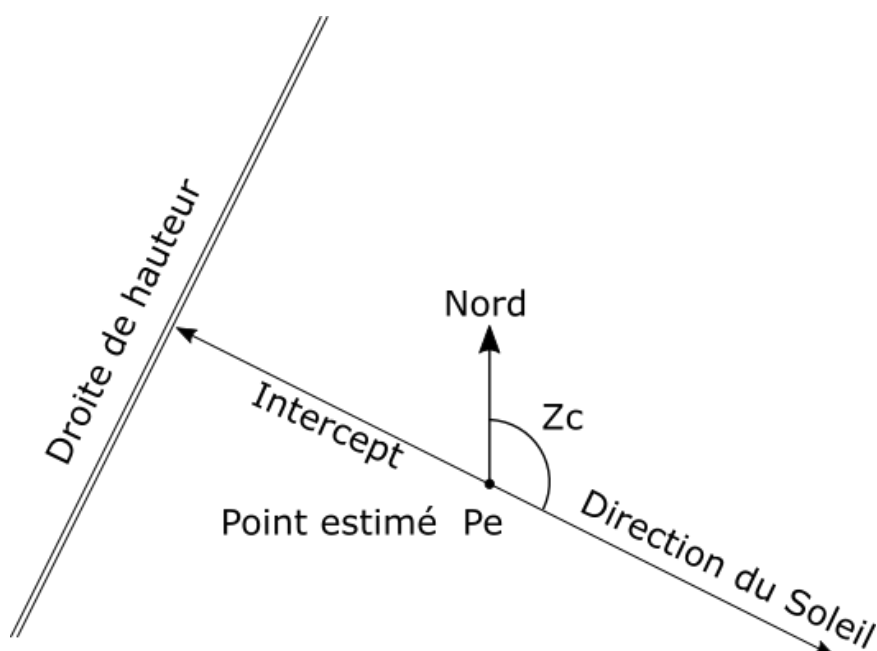
3 - 8 - Tracé sur la carte

A partir du point estimé, tracer une droite dans la direction correspondant à l'azimut calculé Zc, en utilisant par exemple la règle-rapporteur de J. CRAS.

Si $h_v > h_c$ (intercept positif), le navire est plus près du Soleil que le point estimé puisque l'angle mesurant la hauteur du Soleil est plus grand.
 Dans ce cas, reporter sur la droite tracée ci-dessus une distance en milles égale à l'intercept, en direction du Soleil.
 Tracer la perpendiculaire en ce point, qui est la droite de hauteur.



Si $h_v < h_c$ (intercept négatif), le navire est plus loin du Soleil que le point estimé puisque l'angle mesurant la hauteur du Soleil est plus petit.
 Dans ce cas, reporter sur la droite correspondant à l'azimut une distance en milles égale à l'intercept, mais dans la direction opposée à celle du Soleil.
 Tracer la perpendiculaire en ce point, qui est la droite de hauteur.



4 - Translation de la droite de hauteur

La méthode de la droite de hauteur donne une ligne sur laquelle se trouve le navire, mais pas un point.

Il est donc nécessaire de faire une deuxième droite de hauteur pour situer le navire à l'intersection de ces deux droites, et ceci au moins deux à trois heures plus tard afin que l'angle entre les deux droites soit suffisant.

Si le navire est resté immobile entre les deux observations, on peut partir du même point estimé et tracer la deuxième droite de hauteur. Le navire se trouve à l'intersection des deux droites.

Si le navire est en mouvement, on effectue une translation de la première droite selon le vecteur qui correspond au déplacement du navire entre les deux observations. Il est donc important de noter avec soin le cap et la vitesse pendant cet intervalle de temps.

Exemple

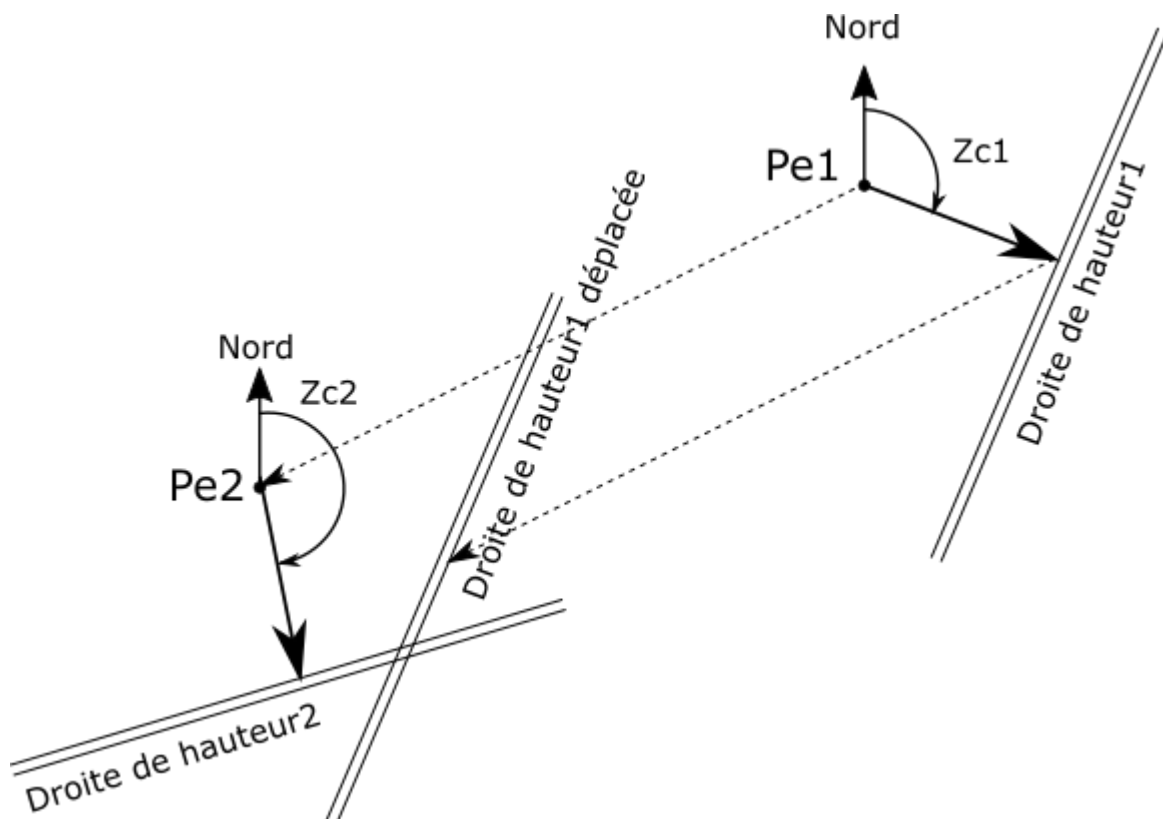
Pe1: point estimé lors de la première observation

Pe2: point estimé lors de la deuxième observation

Déplacement du navire de Pe1 à Pe2 entre les deux observations

Reporter les deux droites de hauteur sur la carte puis déplacer la droite 1, parallèlement à elle-même, d'une distance Pe1Pe2 dans la direction allant de Pe1 à Pe2. (translation d'un vecteur Pe1 Pe2).

Le navire se trouve à l'intersection des deux droites, au moment de la deuxième observation.



5 - Moyens de calcul

Avant la disponibilité des moyens de calcul électroniques, les calculs ci-dessus étaient faits manuellement, avec l'aide de tables facilitant ce travail (Tables de Friocourt, tables HO249, etc).

Les calculatrices programmables ont beaucoup simplifié la tâche dans les années 1970.

Actuellement, il est encore plus facile de faire ces calculs, en utilisant par exemple un tableur ou une application sur smartphone.

Voir page suivante l'exemple utilisé ci-dessus, sous forme de feuille de calcul Excel.

6 - Précision

La méthode de la droite de hauteur de soleil permet d'atteindre une précision de l'ordre de quelques milles, souvent mieux.

Elle est parfaitement adaptée à la navigation au large, sans repère terrestre visible. Ce niveau de précision est tout à fait satisfaisant dans ce cas.

Conditions pour obtenir une bonne précision :

- utiliser un sextant bien réglé
- faire les observations quand la hauteur du Soleil est comprise entre 20° et 80°
- disposer d'une heure très précise : un point de la terre situé sur l'équateur se déplace de 1 mille en 4 secondes du fait de la rotation de la terre. Une erreur de temps de 1 seconde provoque une erreur de longitude de 463 m
- reporter avec soin les valeurs lues dans les éphémérides, l'heure, et la hauteur mesurée

Il est recommandé de faire plusieurs mesures à quelques minutes d'intervalle et de tracer un graphique représentant la hauteur mesurée en fonction de l'heure. Les points doivent être à peu près alignés. Ceci permet de détecter et d'éliminer les mesures de mauvaise qualité.

Position estimée (degrés, minutes décimales)

	degrés	Min décim,	N/S ou E/O	Calculs annexes
Latitude L	47	26,1	N	47,435
Longitude G	3	52,9	O	-3,881666667

Mesure au sextant

Heure TU de la mesure

	Heure	Minutes	Secondes	
(Heure TU très précise)	9	57	46	9,962777778

Hauteur mesurée		Degrés	Minutes,dd	
Hauteur instru bord inférieur soleil	hi	35	48	
Colimation en min +/-	Col		-2	
Table : lire 1ere correction			12	
Table : lire 2eme correction			-0,1	
Hauteur vraie	hv	35	57,9	35,965

Lecture et interpolation sur les éphémérides du soleil le : 19/09/2023

		Degrés	Min decim,	
Angle Horaire à 0h TU jour j	AHv0	181	29,2	181,4866667
Angle Horaire à 0h TU jour j + 1	ou AHG	181	34,5	181,575
				330,9650019
Angle horaire Greenwich	AHG	330	57,9	330,9650019
Angle horaire local	AHL	327	5,0	327,0833352
	Degrés	Min decim,	N / S	
Déclinaison à 0h TU jour j	1	39,9	N	1,665
Déclinaison à 0h TU jour j + 1	1	16,6	N	1,276666667
Déclinaison à l'heure d'observation	D			1,503796721

Résultats

Hauteur calculée au point estimé	hc	35	56,5	35,94205653
Hauteur vraie - rappel	hv	35	57,9	35,965
Intercept Hv - Hc (arrondi)	I	1,4	milles	0,022943471
Azimut soleil	Z			137,8573793
Azimut Vrai (arrondi)	Zv	138	°	137,8573793
Direction				
Depuis le point estimé, reporter sur la carte :	1,4	milles (vers le soleil)	138	