



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>

Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de liaison enseignants et astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (écoles d'été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.

L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement...), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

Le **CLEA** a reçu l'agrément national des associations éducatives complémentaires de l'enseignement public.

Présidents d'honneur

Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel
Cécile Ferrari

Bureau du CLEA pour 2024

Président : Frédéric Pitout
Trésorière : Sylvie Thiault
Trésorier adjoint : Jean-Louis Coustillet
Secrétaire : Grégory Silva
Secrétaire adjointe : Alina Cristian

Responsables des groupes

Cahiers Clairaut : Christian Larcher
Productions pédagogiques : Pierre Causeret
École d'été d'astronomie : Frédéric Pitout
Site web : Jean-Michel Vienney
Réseau de correspondants : Sébastien Dhérissard et Floriane Michel



Merci à celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons :

David Alberto, Didier Barret, Pierre Causeret, Pierre Chastenay, Jacques Chatelon, Léa Choffat, Xavier della Chiesa, Daniel Descout, Michel Dumont, Marie-France Duval, Nicolas Esseiva, Olivier Gayraud, Élisabeth Hébert, François Hurter, Christian Larcher, Maélyss Larrieu, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Pierre Le Fur, Pierre-Yves Livolant, Frédéric Pitout, Jean Ripert, Lionel Ruiz, Pierre Sakic, Béatrice Sandré.

Le bateau au centre de l'image est la goélette Lynx basée aux États-Unis, copie d'un bateau de 1812. Au XIX^e siècle, connaître sa position au milieu de l'océan était encore une tâche complexe, demandant connaissances et instruments. Au premier plan, un marin mesure la hauteur d'une étoile avec une arbastrille. Cet objet, utilisé du XVI^e au XVIII^e siècle a été remplacé ensuite par des instruments plus précis comme le quadrant et le sextant. Tous les navigateurs ont accès maintenant à des systèmes de positionnement par satellites. Celui qui est représenté en haut de l'image est un des satellites Galileo, le système de positionnement européen. Il orbite à une altitude de plus de 20 000 km, donc nettement plus haut que ce que pourrait laisser penser la couverture.

Crédits : Wikimedia commons / kevinmcgill (Lynx) ; ASSP (arbastrille) ; OHB/ESA (satellite).

Les Cahiers Clairaut

Hiver 2024-2025

Éditorial

Comment connaître sa latitude et sa longitude ? La partie thématique de ce numéro aborde l'histoire de cette problématique.

La détermination de la latitude était connue depuis l'Antiquité puisqu'elle correspond, dans l'hémisphère nord à la hauteur de la Polaire.

La détermination de la longitude était historiquement nettement plus difficile. Pendant longtemps un bateau qui voulait, par exemple, aller d'Europe à New York préférait se positionner dès le départ à la même latitude que New York (soit à la hauteur de Madrid) et conserver cette latitude pendant la traversée de l'Atlantique.

L'autre solution consistait à « naviguer à l'estime » mais, le 22 octobre 1707, quatre navires de guerre anglais qui revenaient à leur port d'attache, se brisèrent sur les Îles Scilly situées au sud-ouest de l'Angleterre : deux mille soldats périrent dans la catastrophe. Il devint vital de trouver une solution plus fiable. L'une d'elle consistait à conserver à bord l'heure locale du port d'attache et à la comparer à l'heure locale du navire. Sachant que le Soleil en apparence se déplace de 15° par heure, on en déduisait la longitude du navire.

Mais que choisir comme méridien origine ? À la conférence de Washington en 1884, la majorité des pays choisirent le méridien de Greenwich. La France refusa et conserva le méridien de Paris jusqu'en 1911. Pourtant, vingt-sept ans plus tard, la loi du 11 mars 1911 stipula, dans son premier article, que « L'heure légale en France est l'heure moyenne de Paris, retardée de 9 minutes et 21 secondes » c'est à dire le temps qui s'écoule entre le passage du Soleil au méridien de Paris et son passage à celui de Greenwich.

Actuellement le système de positionnement par satellites permet d'obtenir une position très précise. Notons que le méridien zéro du système de référence WGS 84 utilisé par le GPS passe à 102,778 m à l'est du méridien de Greenwich !

Christian Larcher pour l'équipe

ANNÉE 2024 - 2025
DES GÉOSCIENCES



Sommaire

Actualités

Brèves d'observatoires et autres nouvelles

Frédéric Pitout

2

Avec nos élèves

Distance de M1

Olivier Gayraud, Béatrice Sandré

5

Observation

Premières images de Tsuchinshan-ATLAS

Pierre Le Fur

10

Dossier : Repérage et navigation

13

Histoire

Histoire du méridien d'origine

Xavier della Chiesa

14

Histoire

Figure de la Terre

Jacques Chatelon

18

Mots croisés

24

Histoire

La navigation aux étoiles au XVI^e, XVII^e et XVIII^e

Élisabeth Hébert

25

Histoire

Premières déterminations de la latitude de nuit

David Alberto

30

Repérage dans les Cahiers Clairaut

32

Avec nos élèves

Trouver le nord

Pierre Causeret

33

Article de fond

Le GNSS

Pierre Sakic

34

Solutions trouvez le nord

39

Observation

Le ciel d'hiver 2024-2025

Pierre Causeret

40

Article de fond

Révolutionner l'observation de l'Univers en RX

Maélyss Larrieu, Didier Barret

41

Annnonce AG

43

Observation

Occultation de Saturne par la Lune

Daniel Descout

44

Solution mots croisés

47

Lecture pour la marquise

La Lune

Frédéric Pitout

48

Témoignage

Compte rendu d'un séjour astromaths

Léa Choffat

48



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>

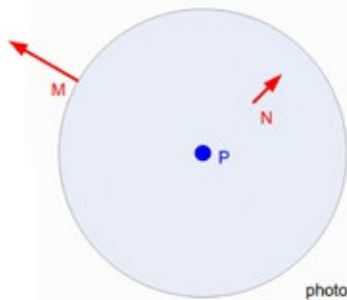
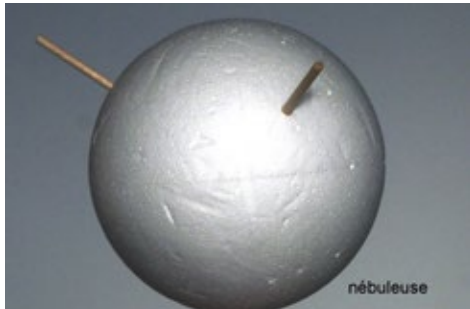
DISTANCE DE LA NÉBULEUSE DU CRABE

Olivier Gayard, Béatrice Sandré

Dans un article précédent (CC 186 été 2024) nous avons vu qu'il était possible, à partir de deux photographies de M1, de mesurer la parallaxe d'expansion, ce qui revient à trouver une vitesse angulaire. Nous allons à présent utiliser une méthode spectroscopique pour déterminer la vitesse linéaire le long de la ligne de visée de la nébuleuse. En combinant ces deux vitesses à un modèle cinématique simplifié d'expansion de la nébuleuse, nous pourrions calculer la distance qui nous sépare de cette nébuleuse.

Modèle simplifié de la nébuleuse du Crabe – Vitesse apparente d'expansion

Imaginons, ce qui est loin d'être le cas, que la nébuleuse du Crabe soit de forme sphérique et que sa vitesse linéaire d'expansion depuis son centre occupé par le pulsar soit isotrope. Alors, tous les points tels que M ont une vitesse dans le plan de la photo tandis que les points tels que N ont une vitesse colinéaire à PN qui ne se projette pas en vraie grandeur sur la photo et qui paraîtra donc plus faible.



Nous avons donc mesuré les vitesses apparentes de 30 détails de la nébuleuse. Les résultats sont donnés dans le tableau ci-contre.

Dans l'article précédent (CC 186 été 2024) nous avons montré que les deux photos, prises à 23 ans d'intervalle, n'avaient pas la même échelle : $\frac{d_{2023}}{d_{2020}} = 3,1863$

La vitesse mesurée en pixels (de la photo HST2000)/an est

$$\omega = \frac{\frac{d_{2023}}{3,1863} - d_{2020}}{23}$$

détail	X2000/px	Y2000/px	d2000/px	X2023/px	Y2023/px	d2023/px	ω px/an
pulsar	2012	1957		5520	4822		
2	936	1985	1076	2005	4764	3515	1,172
3	1124	1655	938	2669	3722	3056	0,918
4	1224	1210	1086	3045	2281	3547	1,194
5	1374	1355	877	3513	2772	2869	1,009
6	1799	1009	972	4953	1691	3182	1,174
7	2307	594	1395	6652	410	4555	1,520
8	2375	947	1073	6835	1571	3507	1,190
9	2584	1385	809	7454	3025	2640	0,853
10	2821	1559	902	8206	3621	2942	0,948
11	2953	1974	941	8594	5004	3079	1,100
12	3033	850	1506	8972	1324	4914	1,584
13	2970	2429	1068	8607	6482	3505	1,394
14	2676	2616	936	7612	7066	3068	1,188
15	2373	2762	882	6609	7504	2895	1,140

détail	X2000/px	Y2000/px	d2000/px	X2023/px	Y2023/px	d2023/px	ω px/an
16	1965	2697	741	5292	7239	2428	0,889
17	1470	2949	1130	3625	7987	3689	1,189
18	914	2679	1314	1864	7051	4282	1,293
19	731	2783	1524	1253	7374	4972	1,573
20	703	2234	1338	1215	5563	4368	1,434
21	733	2649	1454	1268	6930	4746	1,533
22	561	1932	1451	797	4546	4731	1,461
23	1498	855	1216	3988	1161	3969	1,285
24	661	2379	1415	1055	6036	4627	1,600
25	2241	772	1207	6420	979	3947	1,383
26	1143	1409	1027	2756	2924	3353	1,084
27	1262	2979	1268	2950	8068	4140	1,379
28	757	2039	1258	1417	4930	4104	1,325
29	801	1981	1211	1568	4744	3953	1,275
30	698	2058	1318	1216	4985	4307	1,473
						Moyenne	1,261

Nous pouvons retenir comme valeur de la vitesse angulaire d'expansion, la valeur maximale (celle du détail 24) soit 1,600 px/an et qui serait celle d'un point tel que M. Mais, malgré le grand nombre de mesures faites, il est possible que nous soyons « passé à côté » du maximum et que la vraie valeur soit supérieure à 1,600.

Nous préférons utiliser le résultat mathématique suivant : pour une distribution homogène et isotrope d'un vecteur de norme constante V , la valeur moyenne de la norme de sa projection dans un plan est $V \frac{\pi}{4}$ (voir encadré à la fin de l'article).

Dans notre tableau nous calculons la valeur moyenne des 30 vitesses angulaires et obtenons 1,261 px/an.



Source extraction image (fullsize)
Log file tail [-]
(full)

```
B =          0          0  4.6154e-07
          0  1.8126e-07
          1.9358e-07
AP =    0.0015285  6.9294e-08 -4.5902e-07
          2.2251e-07 -2.4076e-07
          -2.6235e-07
BP =    0.0013522  1.0487e-07 -4.6306e-07
          1.4959e-07 -1.8245e-07
          -1.9411e-07
sqrt(det(CD))=0.0995537 [arcsec]
```

Le traitement de l'image du HST par astrometry.net nous a fourni des informations quant à l'échelle de cette photo : 0,0995337 arcseconde/pixel

Nous connaissons maintenant la vitesse apparente d'expansion de la nébuleuse :

$$\omega = 1,606 \times 0,0995337 = 0,1598 "/an$$

Si le déplacement angulaire est exprimé en radians, la vitesse linéaire d'expansion de la nébuleuse est $v = \omega \times d$, où d est la distance de M1 à la Terre.

C'est par une méthode spectroscopique que nous allons déterminer la vitesse linéaire d'expansion et en déduire la distance de la nébuleuse du Crabe.

L'acquisition du spectre

Les spectres ont été acquis dans la nuit du 13 février 2024. Au milieu de la pose, soit à 20 h 59, le rémanent de la supernova, de luminosité de surface 11,90 mag/arcminute², était à une hauteur de 68° et un azimut de 183°. En début de nuit astronomique, (Soleil à 29° sous l'horizon), un léger croissant de Lune illuminé à 20 % était posé sur l'horizon ouest à une hauteur de 20°. La température était encore douce, 13 °C, et la brillance du fond du ciel mesurée par le sky quality meter de 20,85 mag/arcseconde². Les conditions étaient réunies pour faire le spectre de M1. Pour compenser la rotation de la Terre et garder la cible dans la fente du spectroscopie, une monture NEQ6 a été utilisée, (figure 1). Il faudra maintenir lors de poses de 10 minutes et dans une fente de 23 µm l'image de la nébuleuse, alors que le télescope de 8 pouces a une focale de 800 mm ! Il est alors nécessaire

La vitesse d'expansion est donc

$$\omega = \frac{1,261 \times 4}{\pi} = 1,606 \text{ px/an}$$

Ce résultat est légèrement supérieur au maximum supposé précédemment.

de compenser les erreurs de la monture. Pour cela, une caméra d'autoguidage installée au foyer d'une petite lunette de 162 mm de focale fait parfaitement l'affaire. L'erreur de suivi descend à 0,68 arcseconde. Le module de guidage permet à l'aide d'un miroir, (sur lequel est gravé la fente du spectroscopie), de renvoyer à 45° l'image du ciel délivrée par le télescope vers le capteur de la caméra de guidage. La fente du spectroscopie est ici bien visible dans l'image de cette caméra, (figure 2). Toute la lumière de la nébuleuse qui passera à travers cette fente rentrera dans l'élément disperseur formé par un grism, (réseau gravé sur un prisme), et sera ainsi décomposée. Ce spectre sera récupéré à la sortie de l'Alpy 600 (le spectroscopie) par notre caméra principale, une Atik 414 EX. Pour compléter notre montage, est installé un module de calibration. Il permettra de produire les plages de lumière uniforme (flat) ainsi que l'étalonnage avec respectivement des lumières tungstène et néon/argon. Des images de dark et de signaux d'offset tirées d'une banque préalablement établie, terminent de compléter le jeu d'images nécessaires au traitement. Signalons enfin que pour corriger le spectre de la nébuleuse du Crabe de la pseudo réponse instrumentale (réponses de l'instrument et de l'atmosphère), le spectre d'une étoile voisine de M1 a été acquis. L'étoile de référence choisie est HD 35943 car son indice de couleur B-V est faible, (-0,04), qu'elle est proche de M1, 3,4° et son type spectral, B9V, nous permettra d'améliorer la précision de notre étalonnage en utilisant ses raies de la série de Balmer dans le bleu en plus des raies de la lampe néon/argon. Toutes images acquises, nous allons maintenant utiliser une routine pour les traiter avec le logiciel Isis⁽¹⁾ de Christian Buil. Les images sont

corrigées à partir d'images maîtres construites avec les offsets, dark et flat, puis corrigées de la pseudo réponse et enfin calibrées. Au final le RMS (Root Mean Square ou moyenne quadratique en français) mesurant la qualité du spectre est bien inférieur à 1 angström, (0,28 ici), ce qui est satisfaisant ; le pouvoir de résolution est calculé par le logiciel Isis à 443. La baisse de résolution est due au fait que pour augmenter la sensibilité de notre montage, les photosites de notre caméra principale ont été liés deux par deux, (binning de 2). Ce spectre sera transformé en un profil spectral avec le logiciel Visual Spec⁽²⁾ de Valérie Desnoux, qui en permettra aussi l'analyse (figure 4).

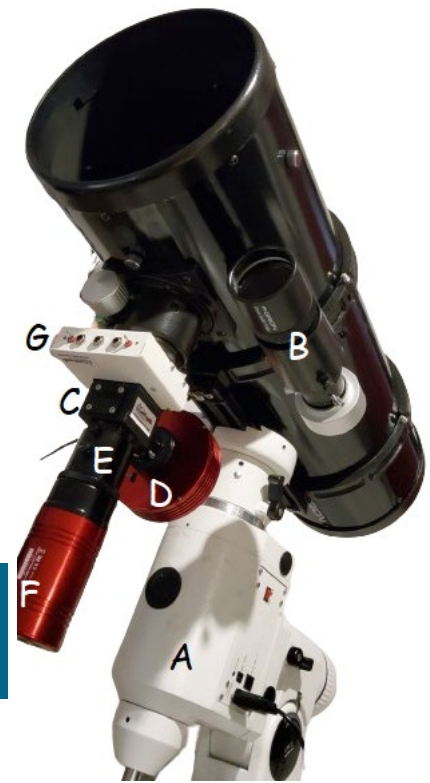


Fig.1. Le montage utilisé. A, la monture, B la lunette d'autoguidage, C le module de guidage, D la caméra de guidage, E le cœur de notre spectroscopie avec le grism, F la caméra principale, G le module d'éta-lonnage.

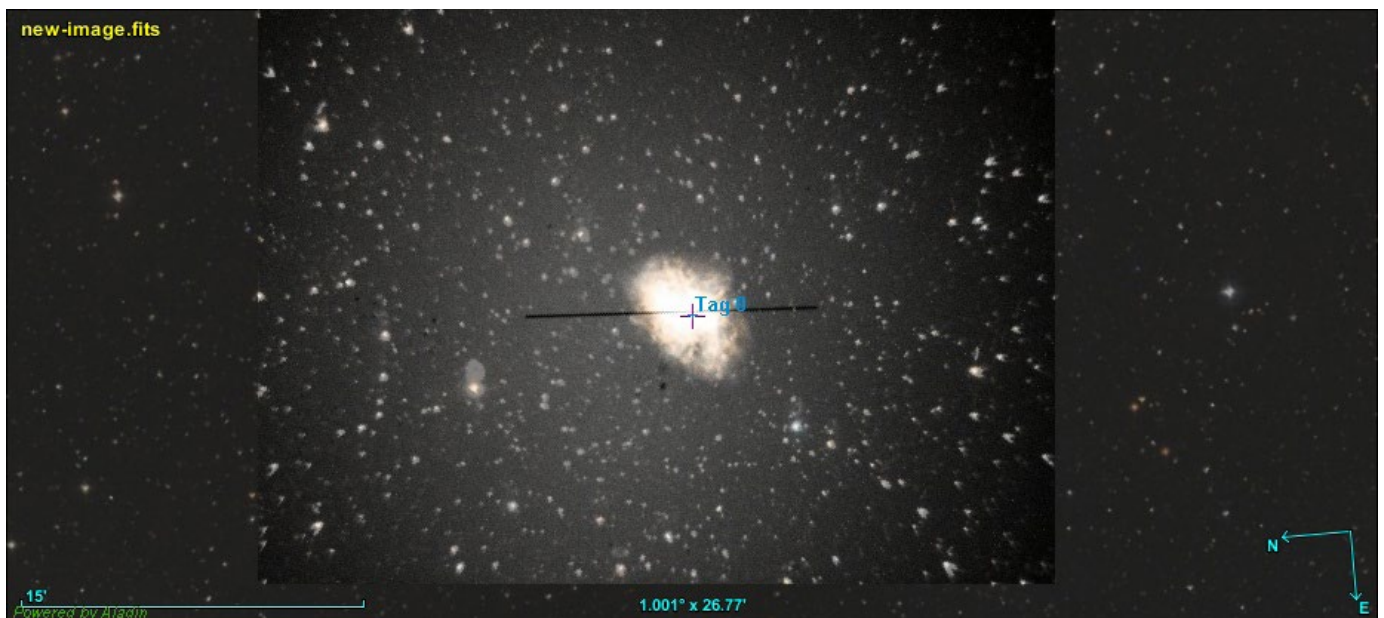


Fig.2. Image de la caméra de guidage (10 minutes de pose), superposée à une image du DSS d'Aladin. La fente du spectroscopie est bien visible, elle est orientée nord sud. L'étiquette Tag 0 correspond à la position du pulsar.

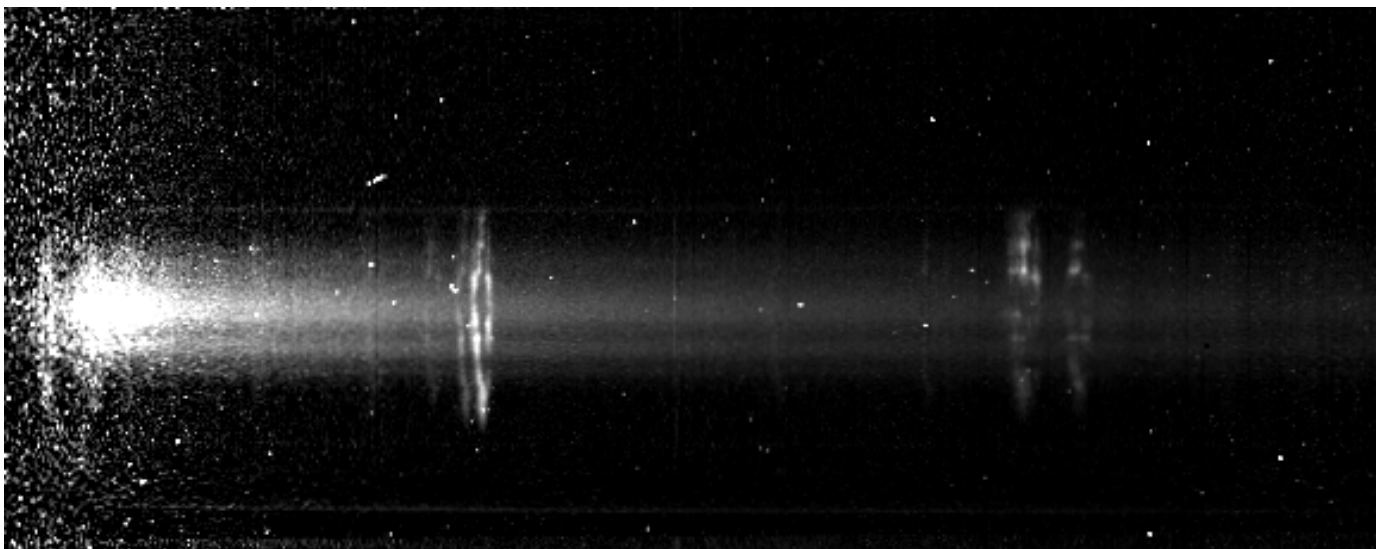


Fig.3. Spectre traité de M1 avec le logiciel Isis, 4 poses de 10 minutes. Bien visibles, de gauche à droite, les raies de l'O[III], de H α et N [II], puis S[II].

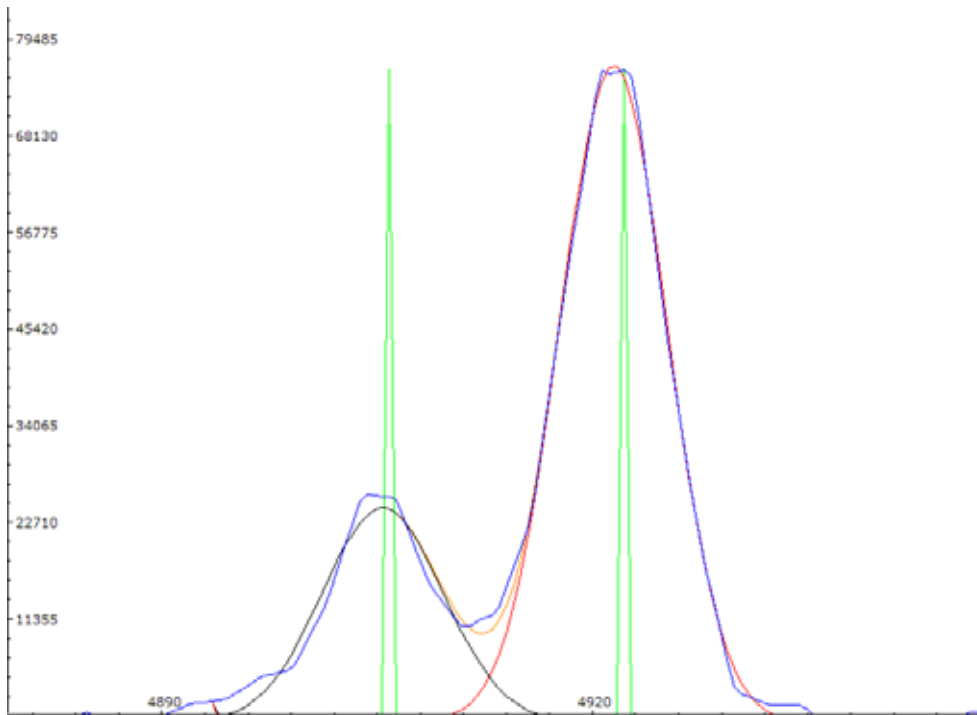


Fig.4. Profil spectral obtenu avec le logiciel Visual Spec. En vert les raies interdites de l'oxygène deux fois ionisé, [OIII], à 4958,92 Å et 5006,85 Å. En bleu le profil spectral de M1 pour la position de la fente telle que sur la figure 2. Le signal est intégré sur 12 pixels de hauteur autour de la position Y = 148, soit en bas du spectre de la figure 3. Nous pouvons vérifier sur ce profil spectral qu'aucun effet notable Doppler Fizeau ne modifie la position de ces raies ; en d'autres termes, sur cette partie du spectre la vitesse radiale est nulle. Les courbes noire et rouge sont les profils gaussiens de l'assistant d'analyse de raie.

Interprétation du spectre de la nébuleuse du Crabe

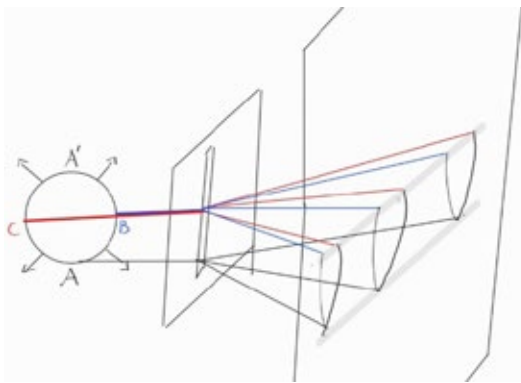


Fig.5. Modèle cinématique simplifié d'expansion de la nébuleuse et explication du dédoublement des raies.

Reprenons notre modèle simplifié (sphérique et isotrope) de la nébuleuse du Crabe. Depuis les zones A et A', l'expansion est perpendiculaire à notre ligne de visée, et par conséquent aucun décalage des raies par effet Doppler Fizeau n'est produit, puisque ces zones ne se rapprochent ni s'éloignent de nous. Notons λ la longueur d'onde particulière d'une de ces raies bien identifiée. En revanche, la lumière produite par les zones B et C est issue respectivement de zones se rapprochant et s'éloignant de nous. La raie précédente notée λ subit alors deux décalages spectraux, le premier inférieur à λ , $(\lambda - \Delta\lambda)$ le second supérieur à λ , $(\lambda + \Delta\lambda)$. Remarquons que la nébuleuse est creuse puisqu'aucune lumière n'apparaît dans l'intervalle $[\lambda - \Delta\lambda ; \lambda + \Delta\lambda]$. Entre ces deux spectres « élémentaires » produits par les zones A/A' et B/C, les composantes tangentielle de la lumière complètent le spectre total et ainsi la forme particulière en lentille et le dédoublement des raies d'émission trouvent leurs explications.

D'après les spectres obtenus à la figure 6 :

$$\Delta\lambda = \frac{502,32217 - 498,06631}{2} = 2,13 \text{ nm}$$

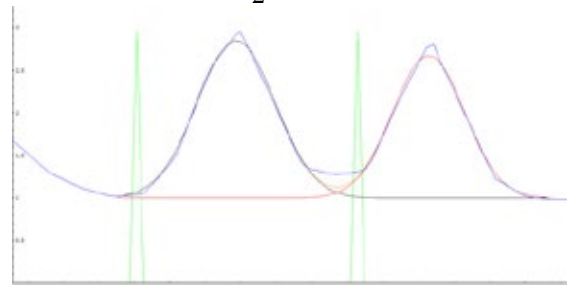


Fig.6. On retrouve en vert les raies interdites de l'[OIII], en bleu le profil spectral de M1 pour la position de la fente telle que sur la figure 2. Le signal est intégré sur 12 pixels de hauteur autour de la position Y = 197, soit vers le milieu du spectre de la figure 3. Nous vérifions cette fois-ci sur ce profil spectral qu'il existe bien un double effet Doppler Fizeau (un vers le rouge et un autre vers le bleu). Les courbes noire et rouge autour de la valeur 5006,85 Å, (pic de droite), sont les profils gaussiens de l'assistant d'analyse de raie. Les valeurs renvoyées sont égales à 4980,6631 Å et 5023,2217 Å.

Calcul de la distance de la nébuleuse du Crabe

Les lois de l'effet Doppler permettent de calculer la vitesse d'expansion :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

c étant la vitesse de la lumière. Commençons par calculer cette vitesse .

$$v = \frac{\Delta\lambda \times c}{2 \times \lambda}$$

$$v = \frac{(5023,22 - 4980,66) \times 300000}{2 \times 5006,85} = 1275 \text{ km/s}$$

La valeur admise est de l'ordre de 1 500 km/s, soit une erreur relative sur l'estimation de cette vitesse de 15 %,

La vitesse linéaire et la vitesse angulaire (exprimée en rad/unité de temps) sont liées par la relation $v = \omega \times d$: .
Après avoir converti la vitesse angulaire en rad/an :

$$\omega = \frac{0,1604 \times \pi}{180 \times 3600} \text{ rad/an}$$

On en déduit

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \omega \frac{d}{c}$$

$$\frac{d}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda \times \omega} = \frac{2,13 \times 180 \times 3600}{500,6 \times 0,1598 \times \pi} = 5492 \text{ an}$$

La nébuleuse du Crabe serait à 5 492 années-lumière de nous.

Ce résultat est correct en apparence puisque la valeur qui fait consensus est autour de 6 300 al. Avec 13 % d'erreur sur la distance, l'ordre de grandeur est le bon. Mais il est entaché de grosses incertitudes que nous n'avons pas réussi à évaluer. L'une de nos erreurs est d'avoir supposé l'expansion homogène et isotrope, et les photographies nous montrent que c'est faux. Aussi, nous avons calculé une distance en usant de valeurs de deux vitesses mesurées en des lieux différents de la nébuleuse et qui ne sont peut-être pas égales ! De plus comme le montre le profil spectral de la figure 7, il est difficile à la résolution

de notre spectroscopie, de mesurer un décalage par effet Doppler-Fizeau. Le dédoublement de raies trop proches fait qu'elles se chevauchent, rendant difficile l'analyse.

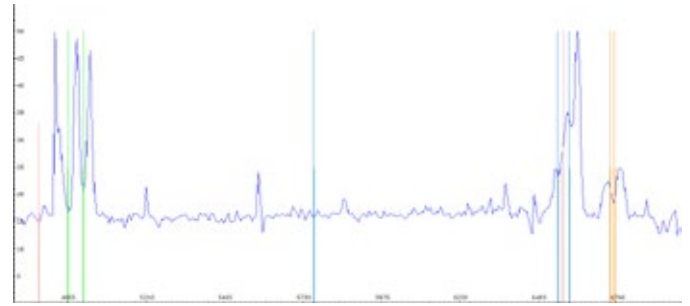


Fig.7. Respectivement de gauche à droite, en rose, $H\beta$ à 4 861 Å, en vert le doublet de [OIII] à 4 959 Å et 5 007 Å, en bleu, [NII] à 5 755 Å, puis le doublet à 6 548 Å et 6 583 Å, entre ce doublet en rose $H\alpha$ à 6 563 Å et en orange le doublet de [SII] à 6 717 Å et 6 731 Å ; valeurs fournies par l'assistant d'éléments. Le signal est intégré sur 12 pixels de hauteur autour de la position $Y = 197$. Plusieurs raies se confondent.

(1) <http://www.astrosurf.com/buil/index.html>

(2) <http://www.astrosurf.com/vdesnoux/download.html>

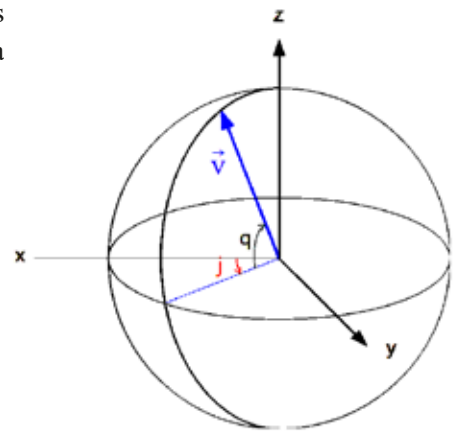
Encadré

Un champ de vecteur $\vec{V}$ de norme constante est uniformément réparti dans toutes les directions de l'espace. On recherche la valeur moyenne de sa projection sur un plan xOy.

La projection de $\vec{V}$ sur le plan xOy est

$$V_{xy} = V \cos \theta$$

L'angle solide élémentaire autour de $\vec{V}$ est $d^2\omega = d\varphi \times \cos\theta d\theta$



Et la valeur moyenne de V_{xy} :

$$\begin{aligned} \overline{V_{xy}} &= \frac{\iiint V \cos \theta d^2\omega}{\iiint d^2\omega} = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} V \cos^2 \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \cos \theta d\theta} = V \frac{\int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \cos^2 \theta d\theta}{\int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \cos \theta d\theta} = \frac{V}{2} \frac{\int_{-\pi/2}^{+\pi/2} (\cos 2\theta + 1) d\theta}{\int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \cos \theta d\theta} \\ &= \frac{V}{2} \times \frac{\left[\frac{\sin 2\theta}{2} + \theta \right]_{-\pi/2}^{+\pi/2}}{[\sin \theta]_{-\pi/2}^{+\pi/2}} = \frac{V}{2} \times \frac{\pi}{2} = V \times \frac{\pi}{4} \end{aligned}$$



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>

HISTOIRE DU MÉRIDIDIEN ORIGINE

par Xavier della Chiesa, cartographe à l'IGN

Introduction antique

La nécessité d'établir les cartes selon des règles mathématiques strictes apparaît dès l'Antiquité, lorsque les disciplines géographiques se rationalisent. Les cartes d'Ératosthène en témoignent : il faut représenter sur une même droite les endroits où la hauteur maximale du Soleil est similaire¹ (c'est-à-dire situés sur un même parallèle) et lier par la même propriété les points où il passe à son midi au même moment (c'est-à-dire sur un même méridien).

Puis, au 2^e siècle avant l'ère commune, la notion se standardise grâce à Hipparque. Puisque le Soleil peut avoir une hauteur comprise entre 0 et 90°, il définit l'équateur comme le parallèle de latitude 0 ; et les pôles, dont l'axe est perpendiculaire au plan équatorial, comme les latitudes 90° (Nord et Sud). Pour leur part et par leur définition, les méridiens ne peuvent être que de grands cercles passant par les pôles et définis selon la rotation complète de la Terre, soit sur 360°. Mais là réside

1 Hauteur maximale (donc à midi solaire) un jour donné, le jour de l'équinoxe par exemple.

une irréductible difficulté car, si l'équateur s'impose naturellement comme origine des latitudes, il n'en existe pas d'équivalent pour les longitudes : aucun méridien ne se distingue des autres par quelque particularité géométrique que ce soit. Ainsi, le choix de leur origine ne peut être qu'arbitraire et, au mieux, guidé par un souci d'ordre purement pratique.

Le premier « premier méridien »

Tant que les cartes sont restées à échelle locale et n'étaient pas utilisées conjointement, le méridien origine de chacune a pu être choisi au cas par cas, sur l'un de ses bords ouest ou est, et les longitudes être graduées positivement sur l'ensemble du plan. Mais, dès le 1^{er} siècle de l'ère commune, la vocation encyclopédique de l'Atlas d'Alexandrie exige l'établissement d'une origine stable sur laquelle toutes les cartes devront par la suite être appuyées afin d'assurer leur compatibilité.

En achevant la constitution de l'Atlas, Ptolémée suit la suggestion de son prédécesseur Marin de Tyr de prendre pour référence le *Méridien des îles Fortunées* situé

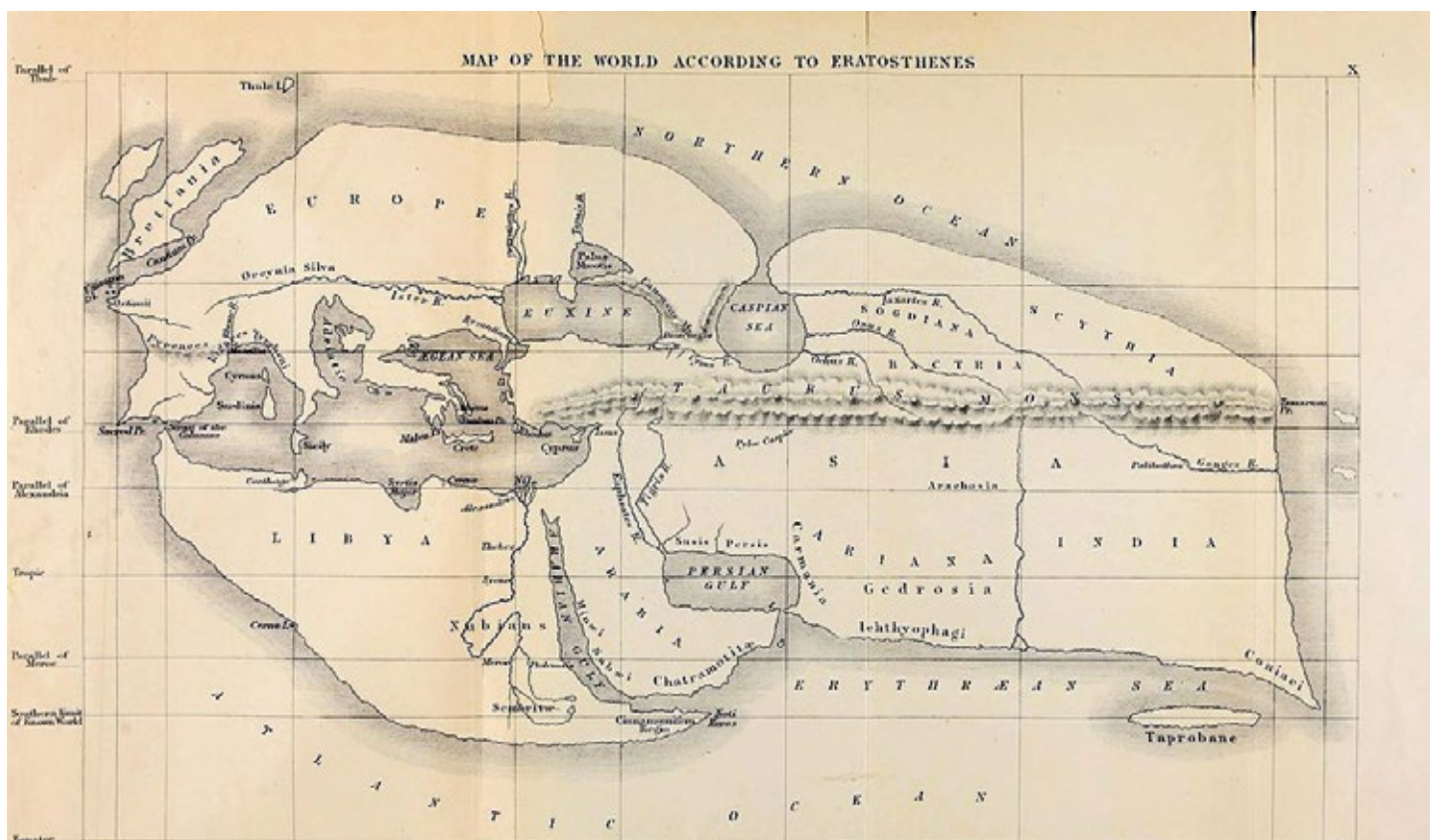


Fig.1. Carte d'Ératosthène où figurent parallèles et méridien de villes remarquables (crédit BnF).



Fig.2. Une carte d'Alexandrie et son méridien origine aux Canaries au bord gauche (crédit BnF).

légèrement au large des îles Canaries, qui étaient les terres les plus occidentales du monde connu des Grecs. En comptant les longitudes de manière croissante d'ouest en est, elles étaient ainsi positives sur l'Europe et le bassin méditerranéen – et pouvaient même être étendues jusqu'en Extrême-Orient sans la moindre difficulté. L'Atlas d'Alexandrie et les autres travaux de Ptolémée ont gardé leur autorité pendant près de 1 400 ans. Mais la découverte, du point de vue européen, de terres plus occidentales que les Canaries à la fin du 15^e siècle allait changer la donne.

Les complications de la Renaissance

Christophe Colomb et les autres premiers explorateurs n'ont pas remis en cause le méridien choisi par Ptolémée comme origine des longitudes. Il aurait pourtant été légitime de le modifier car les Îles du Cap-Vert, connues depuis le milieu du 15^e siècle, sont de 7° plus occidentales encore (voir encadré « Un autre méridien important : Tordesillas »). Mais, pour éviter de recourir à des nombres négatifs qui étaient à cette époque considérés comme absurdes, un nouveau compte positif croissant vers l'occident est créé. Il donne naissance aux concepts de *longitudes Est* (en Europe) et *Ouest* (en Amérique). Ainsi, le compte des méridiens est calqué sur celui, depuis longtemps établi, des parallèles nord et sud de part et d'autre de l'équateur. Notons en outre que, la cartographie nécessitant une rigueur géométrique de plus en plus grande, la définition restée vague du méridien de Ptolémée est précisée au 17^e siècle, devenant dès lors le *Méridien de Ferro*, situé sur El Hierro, l'île la plus occidentale des Canaries.

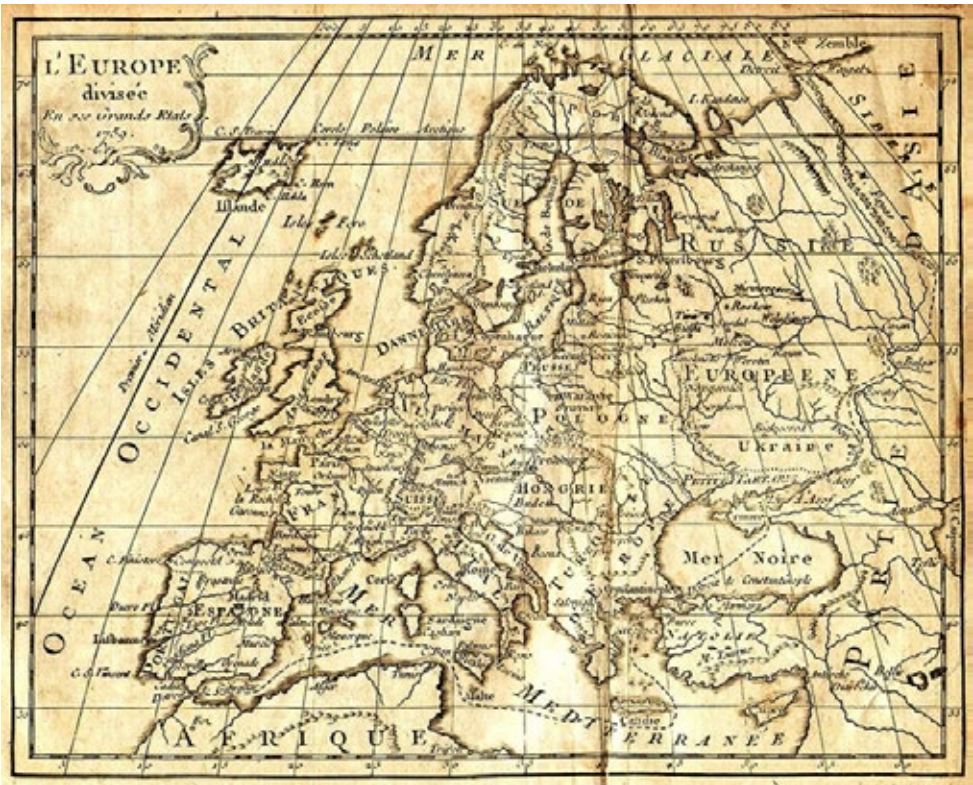
Toutefois, avec la Renaissance, l'Europe ne retrouve pas seulement son héritage

scientifique grec mais remet également le sens pratique très particulier des Romains au goût du jour. La course aux grandes découvertes se traduit par une concurrence effrénée en matière de cartographie : chaque puissance maritime développe la sienne et, les uns après les autres, les pays européens optent pour des méridiens origine qui leur sont propres. Accessoirement, ces références très nationales les mettent au centre du monde – car, au-delà du chauvinisme commun, leur intérêt est de caractériser les distances séparant les différents points du globe à la mère patrie (voir encadré « Tout le monde veut être au centre »).

Greenwich, une nouvelle internationalisation

Les tendances « natiocentristes » finissent néanmoins par céder le pas à la nécessité d'uniformiser les systèmes cartographiques au 19^e siècle lorsque, avec les progrès de l'industrie, les échanges commerciaux se développent à l'échelle mondiale. Si, bien entendu, chaque pays propose sa propre référence comme standard international, la puissance maritime anglaise finit par imposer la sienne sur laquelle un pratique système des fuseaux horaires avait en outre été imaginé dès 1872 : lors de la Conférence internationale du méridien en 1884, 22 pays sur les 25

Fig.3. Carte d'Europe dressée en 1763 avec le méridien origine de Ferro (île de Fer) aux Canaries, établi au 17^e siècle par les géographes de Louis XIII (source Wikipedia / Dictionnaire géographique portatif - Paris).



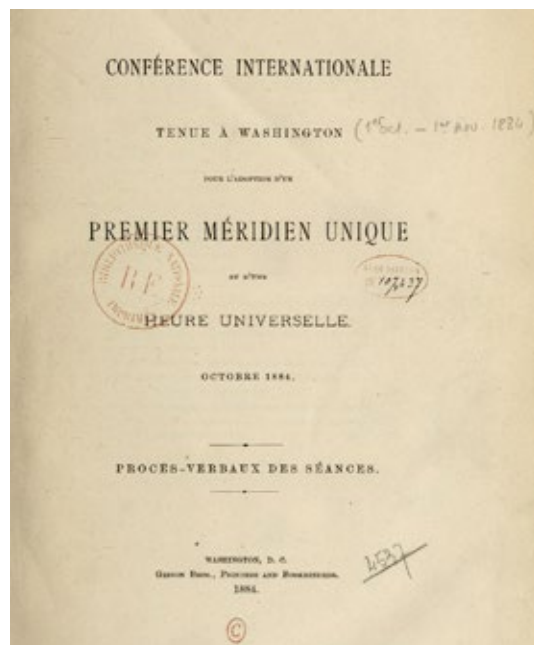


Fig.4. Couverture des actes de la Convention du Méridien de Washington, 1884 (crédit BnF).

réunis à Washington adoptent ainsi la référence du Greenwich Royal Observatory, situé en banlieue de Londres. En contrepartie de cette reconnaissance internationale, le Royaume-Uni s'engage à adopter le système métrique et rejoint en tout cas la Convention du Mètre la même année.

Tous les pays producteurs de cartes partageront dès lors un système de coordonnées commun – à quelques rares exceptions, sur lesquelles nous reviendrons... Mais notons déjà que, la Conférence de Washington étant postérieure à la guerre de 1870, les cartes des 13 premières années allemandes étaient appuyées sur le Méridien de Ferro ; y compris, donc, celles d'Alsace-Moselle ; et, lorsque la France a récupéré cette cartographie en 1918, la longitude de Strasbourg similaire à celle de Chisinau en Moldavie a beaucoup perturbé les géographes français...

Les complications de l'espace

Néanmoins, on aurait tort de croire que le méridien de Greenwich adopté en 1884 est resté la référence internationale des longitudes, car il n'en est rien.

Des systèmes révolutionnaires de positionnement géographique se

développent à la fin du 20^e siècle : héritiers de l'astronautique, les *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) s'appuient sur les signaux de satellites qui leur sont spécialement dédiés. Le premier GNSS est l'archicélèbre *Global Positioning System* (GPS) américain et sa référence géographique d'étendue mondiale WGS84 est naturellement appuyée sur le méridien de Greenwich.

Mais la définition *astronomique* du méridien, nécessaire lorsqu'il s'agit de référence spatiale, s'éloigne quelque peu de sa mesure *terrestre*, du fait de l'irrégularité du champ de pesanteur de la planète : il existe une différence entre la direction du fil à plomb en un lieu donné, qui matérialise sa verticale et sa *longitude astronomique*, et la perpendiculaire à l'ellipsoïde de référence, qui définit sa *longitude géodésique*. Aussi infinitésimale soit-elle en termes d'angle, elle se traduit par un décalage à la surface du globe qui situe le trait du méridien origine, matérialisé pour le plaisir des visiteurs de l'observatoire de Greenwich, à 110,55 mètres à l'ouest de la « longitude astronomique 0 » du système WGS84.

Aujourd'hui donc...

Avec l'hégémonie actuelle des GNSS en général et de GPS en particulier, le système de coordonnées WGS84 est devenu la référence dont personne ne s'aviserait de s'affranchir pour constituer une carte. Les derniers pays réfractaires à la standardisation des longitudes sur le méridien de Greenwich ont capitulé devant sa nécessité ; ainsi la France qui, pour entretenir sa cartographie nationale, a adopté son nouveau système RGF93 centré sur Greenwich... le 31 décembre 2000.

L'affaire est-elle à présent définitivement close ? pas si sûr. Car GPS n'est plus seul sur la planète GNSS. Le système russe *Glonass*, le chinois *Beidou* et l'européen *Galileo*

ont leurs propres références, mieux adaptées à leurs spécificités. En outre, il existe d'autres techniques spatiales de mesures terrestres complémentaires aux GNSS, telles que DORIS ou le VLBI qui, elles aussi, ont leurs références spécifiques. Une référence combinant l'ensemble de ces techniques a été définie dès les années 1990 : l'*International Terrestrial Reference Frame* (ITRF). Mais ses détails techniques sont toujours discutés par différents pays et, par conséquent, son adoption politique n'est pas encore d'actualité. Toutefois, il ne menace en rien de remettre en cause un méridien origine à présent défini avec suffisamment de hauteur – au sens propre comme au figuré.

Fig.5. Matérialisation du méridien géodésique origine à Greenwich (Crédit J.-C. Berçu).



Ne pourrait-on pas faire mieux ?

Les méridiens Est et Ouest semblent pratiques : ils bouclent le tour de la Terre en étant comptés positivement jusque 180 puis à rebours ensuite, n'induisant aucun retour brutal à 0. Ce saut quantitatif évité a pourtant aujourd'hui une réalité : la ligne de changement de date, qui pourrait légitimement s'imposer comme longitude 0. Elle oscille actuellement de part et d'autre du méridien 180° afin de suivre fuseaux horaires, frontières et côtes, en passant notamment par le détroit de Béring. Il serait intéressant de prendre le méridien de Béring (169° O) pour origine de longitudes croissantes d'ouest en est selon un principe horaire (de 0 à 23 h 59 min 59 s) : la différence de longitude traduirait alors rigoureusement le décalage horaire entre deux points.

Cependant, il semble nécessaire de garder l'échelle de 360 degrés très adaptés aux calculs géométriques. On pourrait donc envisager une solution complémentaire inverse : découper le jour en 360 unités plutôt qu'en nos traditionnelles « 24 heures, 60 minutes, 60 secondes » qui ne correspondent à rien... et induisent de fortes confusions entre les minutes d'angle et les minutes de temps, qui n'ont aucun lien réel. Il serait même possible d'aller plus loin avec la numération en base 12, qui pourrait avantageusement remplacer toutes les autres (décimale, sexagésimale, hexadécimale, etc. – avec une réserve pour le cas particulier de la base binaire) mais c'est une autre histoire. La rationalisation de nos unités de mesure est en tout cas encore loin, très loin, de la perfection.

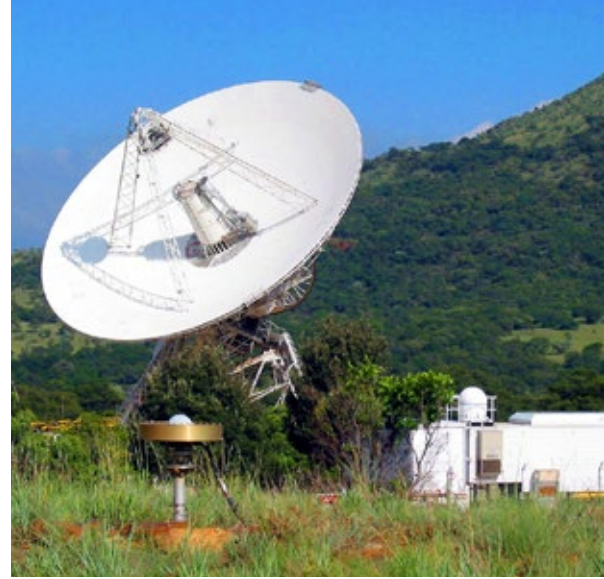


Fig.6. Antenne VLBI derrière une antenne de réception GNSS et à côté d'une station laser (une autre technique de géopositionnement spatial – à droite), à Hartebeesthoek en Afrique du Sud (crédit IGN).



Fig.7. La ligne de partage du traité de Tordesillas sur le planisphère de Cantino (Wikipedia / Bibliothèque Estense de Modane).

Un autre méridien important : Tordesillas

À la fin du 15^e siècle, personne (à part les cartographes...) ne doute que le voyage de Christophe Colomb a ouvert une route occidentale vers l'Extrême-Orient pour l'Espagne. Elle déclenche de ce fait une course de vitesse contre le Portugal qui, de son côté, a déjà contourné l'Afrique. Afin d'anticiper l'inévitable empoignade des deux puissances maritimes pour la possession des terres qui seront découvertes à l'autre bout du globe, il est décidé de les partager *a priori*. Le traité de Tordesillas du 7

juin 1494 définit une longitude de démarcation située 370 lieues (environ 1 786 km) à l'ouest du Cap-Vert : au Portugal ce qui se trouve à l'est de ce méridien et à l'Espagne ce qui est à l'ouest. En Asie, cette ligne de partage est naturellement prolongée par son méridien antipode. Cette longitude du traité de Tordesillas est 46° 37' ouest dans le système actuel, soit celle de Sao Paulo. Elle rejette donc la partie orientale de l'Amérique du Sud dans les territoires attribués à Lisbonne et explique que le Brésil soit le seul pays de langue portugaise au milieu d'un continent hispanophone.

Tout le monde veut être au centre

Terceira (Açores) pour le Portugal, Tolède pour l'Espagne, Londres pour l'Angleterre, Paris pour la France, Ténériffe (Canaries) pour les Provinces-Unies... la liste des références qui voient le jour au 16^e siècle serait longue et digne de tirer à Ptolémée des larmes mélancoliques, tant est loin le temps du partage des connaissances scientifiques et de l'harmonisation internationale des langages et des références.

Références

Les sciences géographiques dans l'Antiquité, par Raymond D'Hollander (AFT).
Historique de la Cartographie, par Georges Alinhac (IGN).
Géographie de Ptolémée (BnF)
Le Langage des géographes, par François de Dainville.
 « Greenwich or not Greenwich », par Robert Vincent, in XYZ n° 120 (2009).



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>