

N° 170
DECEMBRE
2024

LE CIEL DE RHUYS



Quelque chose d'anormal s'est passé sur Uranus il y a 40 ans !

La sonde Voyager 2 est la seule à avoir survolé Uranus. C'était il y a presque 40 ans. Et les données qu'elle a renvoyées ont déconcerté les astronomes. Mais aujourd'hui, une équipe suggère que la mission a enregistré quelque chose d'anormal dans la vie d'une planète qui pourrait ne pas être aussi exceptionnelle que cela, finalement.

La sonde Voyager 2 a été lancée en 1977. Elle vogue désormais dans le milieu interstellaire, à quelque 21 milliards de kilomètres de la Terre et doit économiser son énergie pour continuer sa route. Mais en 1986, elle faisait un survol remarqué d'Uranus. Un survol au cours duquel les astronomes ont observé, dans la magnétosphère de la planète gazeuse, des phénomènes qui les ont complètement déconcertés. De quoi conforter la réputation qu'Uranus s'était déjà faite en tournant autour d'un axe presque horizontal. Celle d'une planète exceptionnelle dans notre Système solaire.

Ce que la sonde Voyager 2 a révélé, c'est une magnétosphère complètement décentrée et déséquilibrée. Comme aucune autre dans notre Système solaire, faisant apparaître des ceintures de radiations électroniques étonnamment intenses. Des ceintures sans pourtant de source de particules énergisées pour les alimenter.

Des données perturbées par une météo spatiale exceptionnelle

Les données de Voyager 2 montrent également une magnétosphère presque dépourvue de plasma, alors même que les lunes d'Uranus devraient l'alimenter. C'est ce que font les lunes glacées des autres planètes géantes de notre Système solaire. Seule explication un peu décevante en vue : les lunes d'Uranus doivent être mortes. Mais des chercheurs ont réanalysé les données renvoyées par Voyager 2 il y a 38 ans. Et ils estiment maintenant que ces observations ne sont ni plus ni moins que le fruit d'une sorte de coïncidence cosmique. Dans la revue *Nature Astronomy*, ils racontent que, quelques jours avant le survol de Voyager 2, une augmentation d'un facteur 20 de la pression dynamique du vent solaire a été enregistrée. Et ils en concluent que la planète gazeuse a été frappée, à ce moment-là, par un type inhabituel de météo spatiale. « *Ce nouveau travail explique certaines des contradictions apparentes et il changera une fois de plus notre vision d'Uranus* », remarque Linda Spilker, astronome au *Jet Propulsion Laboratory*, dans un communiqué de la Nasa. Elle était de ceux qui attendaient les images, derrière leurs écrans, en 1986.

Quelles implications pour Uranus et ses lunes ?

Ce qui a mis la puce à l'oreille des chercheurs, c'est ce qu'ils ont enregistré avec la mission Messenger et ses milliers d'orbites autour de Mercure. Une foule de données classiques et quelques rares durant lesquelles l'activité de notre Soleil érodait complètement le champ magnétique de la planète. Pour Uranus, les chercheurs expliquent que lorsque le plasma porté par le vent solaire a frappé la planète géante en 1986 - comme cela n'arrive finalement que moins de 5 % du temps -, il a comprimé sa magnétosphère. À 20 % seulement de son volume ! Éjectant son plasma. Et intensifiant aussi brièvement la dynamique de la magnétosphère de la planète gazeuse. De quoi alimenter également les ceintures observées par Voyager 2 en y injectant des électrons.

Si des missions en cours pour aller y voir de près confirment ces résultats, les astronomes pourraient être amenés à revoir l'image qu'ils se sont faite de l'intérieur d'Uranus. Ils pourraient aussi revoir leur façon d'aborder les cinq lunes majeures de la planète géante. Les données de Voyager 2 laissaient en effet penser qu'elles étaient géologiquement inertes. Mais elles pourraient finalement être actives et abriter des océans que nous pourrions réussir à détecter sous la couche de glace. De là à espérer y trouver des traces d'une vie extraterrestre... il reste tout de même un cap que les astronomes ne sont pas encore tout à fait prêts à franchir.

Le ciel de décembre

Sommaire:

- Edito
- Le ciel du mois
- Essaims, étoiles filantes, Planètes
- La Lune
- Carte du ciel
- -Cours d'astronomie à suivre
- - Applications
- **Biographie de :Rheticus**
- **Constellation : Le Cocher**
- **Légende Séléné**
- Le saviez-vous ?
- Enigmes
- ARP 148
- Lire, voir, sortir

2024 12 01 01:00 Pluie d'étoiles filantes : Phénicides de déc. (durée = 11,0 jours)

2024 12 01 07:22 NOUVELLE LUNE

2024 12 02 04:31 Comète 3D-A Biela à son périhélie (dist. au Soleil = 0,827 UA; magn. = 8,7)

2024 12 02 22:58 Opposition de l'astéroïde 13 Egeria avec le Soleil (dist. au Soleil = 2,426 UA; magn. = 10,1)

2024 12 05 01:46 Rapprochement entre la Lune et Vénus (dist. topocentrique centre à centre = 2,5°)

2024 12 06 03:18 CONJONCTION INFÉRIEURE de Mercure avec le Soleil (dist. géoc. centre à centre = 1,4°)

2024 12 06 15:00 Mercure à son périhélie (distance au Soleil = 0,30750 UA)

2024 12 07 14:51 Rapprochement entre Vénus et Pluton (dist. topocentrique centre à centre = 0,9°)

2024 12 07 21:58 OPPOSITION de Jupiter avec le Soleil

2024 12 08 16:27 PREMIER QUARTIER DE LA LUNE

2024 12 09 01:00 Pluie d'étoiles filantes : Sigma Hydrides (7 météores/heure au zénith; durée = 12,0 jours)

2024 12 09 01:00 Pluie d'étoiles filantes : Monocérotides (3 météores/heure au zénith; durée = 20,0 jours)

2024 12 12 14:18 Lune au périgée (distance géoc. = 365361 km)

2024 12 13 17:59 Rapprochement entre la Lune et les Pléiades (dist. topocentrique centre à centre = 0,7°)

2024 12 13 18:33 Fin de l'occultation de HD 23753 (magn. = 5,44)

2024 12 14 02:00 Pluie d'étoiles filantes : Géminides (150 météores/heure au zénith; durée = 12,0 jours)

2024 12 14 05:59 Opposition de l'astéroïde 15 Eunomia avec le Soleil (dist. au Soleil = 2,277 UA; magn. = 8,1)

2024 12 14 17:46 Rapprochement entre la Lune et Jupiter (dist. topocentrique centre à centre = 4,7°)

2024 12 15 10:02 PLEINE LUNE

2024 12 16 01:00 Pluie d'étoiles filantes : Coma Bérénicides (3 météores/heure au zénith; durée = 11,0 jours)

2024 12 21 10:20 SOLSTICE D'HIVER

2024 12 22 11:00 Pluie d'étoiles filantes : Ursides (10 météores/heure au zénith; durée = 9,0 jours)

2024 12 22 23:18 DERNIER QUARTIER DE LA LUNE

2024 12 24 08:25 Lune à l'apogée (distance géoc. = 404485 km)

2024 12 25 06:00 PLUS GRANDE ÉLONGATION OUEST de Mercure (22,0°)

2024 12 30 23:27 NOUVELLE LUNE

Etoiles filantes, essaims et comètes.

Chi-Orionids (XOR)

Le radiant de l'essaim des chi-Orionids (XOR) est situé à environ 5 degrés de l'étoile *beta Tau-ri*, connue sous le nom de Elnath. Les météores sont assez lents, avec une vitesse de 30 km par seconde. Le taux horaire moyen (ZHR) est d'environ 3 météores par heure au moment du maximum. Les chi-Orionides sont majoritairement de couleur jaunâtre, mais quelques membres bleus-verts ont également été observés.

L'essaim fut découvert par William Denning qui observa une activité en 1876 et 1877. En 1879, E. F. Sawyer confirma le radiant calculé par Denning. Les observations ultérieures de l'essaim montrèrent qu'il existait en réalité deux branches distinctes, l'une au nord, l'autre au sud, moins active, et distante d'environ 3 degrés.

Période d'activité : du 26 Novembre au 15 Décembre

Maximum : 02 Décembre Longitude solaire (λ) : 250°

position du radiant au moment du maximum

ascension droite (α) : 082° déclinaison (δ) : $+23^\circ$

Vitesse (en km/s) : 30 r : 3.0 ZHR : 3

Phoenicides de Décembre (PHO)

Le radiant des Phoenicides de Décembre (PHO) est situé dans la constellation du Phénix, aussi c'est un essaim visible depuis l'hémisphère sud. Les météores sont plutôt lents, avec une vitesse de 18 km par seconde. Le taux horaire moyen (ZHR) est variable et généralement de seulement 3 météores par heure ou parfois même moins, mais peut atteindre environ 100 météores par heure comme ce fut le cas en 1956.

L'essaim météoritique des Phoenicides découvert en 1956 est probablement produit par les débris abandonnés sur sa trajectoire par la comète D/1819 W1 (Blanpain), une comète découverte à Marseille le 27 Novembre 1819 par Jean-Jacques Blanpain (1777-1843) et observée par Jean-Louis Pons (1761-1831) le 04 Décembre.

La comète D/1819 W1 (Blanpain), considérée comme perdue, a été identifiée avec un astéroïde de type Apollo, 2003 WY25, découvert le 22 Novembre 2003 par le Catalina Sky Survey.

Période d'activité : du 28 Novembre au 09 Décembre Maximum : 06 Décembre

Longitude solaire (λ) : 254.25° , position du radiant au moment du maximum

ascension droite (α) : 018° , déclinaison (δ) : -53°

Vitesse (en km/s) : 18, r : 2.8 ZHR : variable, généralement rien, mais peut atteindre 100

Comète associée : D/1819 W1 (Blanpain) /2003 WY25

Puppides-Vélides (PUP)

L'essaim des Puppides-Vélides (PUP) est observable principalement depuis l'hémisphère sud.

Les météores sont d'une vitesse moyenne d'environ 40 km par seconde. Le taux horaire moyen (ZHR) est d'environ 10 météores par heure.

La découverte de cet essaim pourrait être attribuée à Ronald A. McIntosh, qui a listé cet essaim dans son papier intitulé "An Index to Southern Meteor Showers" en 1935, faisant état de deux météores détectés dans la période 1927-1934.

C. Hoffmeister passa une grande partie de l'année 1937 dans le Sud-ouest de l'Afrique, où il prit part à une expédition pour isoler des radiants de météores dans le ciel austral. Ces observations semblent avoir laissé entrevoir en premier que cet essaim produisait un radiant assez diffus.

Des observations par radar ont été entreprises en 1956 en Nouvelle-Zélande par C. D. Ellyett et K. W. Roth. Le WAMS (Western Australia Meteor Section) a commencé les observations de l'essaim en 1977.

Période d'activité : du 01 au 15 Décembre Maximum : 06 Décembre

Longitude solaire (λ) : 255°

position du radiant au moment du maximum

ascension droite (α) : 123° déclinaison (δ) : -45°

Vitesse (en km/s) : 40 r : 2.9 ZHR : ~ 10

Monocérotides (MON)

Les météores des Monocérotides (MON) sont de vitesse moyenne, environ 42 km par seconde. Le taux horaire moyen (ZHR) est faible, avec environ 23 météores par heure au moment du maximum. L'essaim est probablement à l'origine de nombreux bolides spectaculaires observés au onzième siècle. Bon nombre de ceux-ci sont consignés dans les écrits de Ma Tuan-lin, un historien chinois, qui collecta des observations de plus de 1500 bolides sur une période de 24 siècles.

Cet essaim a été découvert par F. L. Whipple en 1954, au cours d'une recherche d'orbite portant sur 144 météores détectés lors d'une étude photographique de l'Observatoire du Collège de Harvard sur la période 1936-1951. Deux des météores photographiés en 1950 possédaient une orbite similaire, qui plus est, similaire à celle de la comète C/1917 F1 (Mellish), d'une période orbitale d'environ 145 ans.

En 1961, R. E. McCrosky et A. Posen, (Harvard College Observatory) publièrent une liste de 2529 orbites de météores obtenues durant le Harvard Meteor Project sur la période de Février 1952 à Juillet 1954. Ils trouvèrent trois météores appartenant à l'essaim des Monocerotides, offrant par conséquent la première confirmation qu'un essaim avec les éléments orbitaux suggérés par Whipple était présent.

Période d'activité : du 27 Novembre au 17 Décembre Maximum : 08 Décembre

Longitude solaire (λ) : 257°

position du radiant au moment du maximum ascension droite (α) : 100°

déclinaison (δ) : $+08^\circ$ Vitesse (en km/s) : 42 r : 3.0 ZHR : 2

Comète associée : C/1917 F1 (Mellish)

Sigma-Hydrides (HYD)

Les météores des sigma-Hydrides (HYD) sont très rapides, avec une vitesse de 58 km par seconde. Le taux horaire moyen est faible, avec environ 3 météores par heure au moment du maximum.

La découverte de cet essaim pourrait être attribuée à Richard E. McCrosky et Annette Posen. En 1961, ils ont édité une liste de 2529 orbites photographiques de météore qui avaient été calculées à partir des photographies de deux stations obtenues pendant le Harvard Meteor Project de 1952-1954. Ils ont identifié 7 de ces orbites comme indiquant un essaim produisant un radiant proche de *sigma Hydri*. Plus tard cette année-là, Luigi G. Jacchia and Fred L. Whipple ont édité une analyse de 413 orbites photographiques précises également obtenues pendant la période 1952-1954 et ont identifié 3 météores comme appartenant à cet essaim. La confirmation d'un essaim en Décembre de ce radiant a été faite par des observateurs à Wal-tair, Inde, au cours d'une étude d'essaims météoritiques mineurs dirigée par M. Srirama Rao, P. V. S. Rama Rao et P. Ramesh au cours de la période 1961-1967.

Une recherche à travers les précédents décomptes édités énumérant les radiants visuels révèle des indications occasionnelles de la présence de cet essaim dans la dernière moitié du 19ème siècle et même au 20ème siècle. Mais les séries d'observations les plus saisissantes extraites à partir de ces enregistrements plus anciens, sont les observations en 1937 faites par Cuno Hoffmeister dans le sud-ouest de l'Afrique de cinq météores appartenant aux sigma-Hydrides.

Période d'activité : du 03 au 15 Décembre Maximum : 11 Décembre

Longitude solaire (λ) : 260°

position du radiant au moment du maximum

ascension droite (α) : 127° déclinaison (δ) : $+02^\circ$

Vitesse (en km/s) : 58 r : 3.0 ZHR : 3

Géminides (GEM)

Le radiant des Géminides (GEM) est situé au nord-ouest de l'étoile Castor (*Alpha Geminorum*) de magnitude visuelle 1.8. L'emplacement du radiant des Géminides, situé à quelques degrés de l'écliptique, a pour conséquence que l'essaim est également observable dans une grande partie de l'hémisphère sud. Les météores ont une vitesse moyenne d'environ 35 km par seconde.

Les premières indications de l'essaim météoritique des Géminides ont été publiées par le belge Adolphe Quetelet (1841-1861) qui mentionna une haute activité météoritique les 12-13 Décembre 1830 à Heiligenstadt (Allemagne), d'où 40 bolides avaient été signalés. En 1862, les observateurs ont pu voir environ 15 étoiles filantes par heure. Pendant plus d'un siècle, les astronomes ont cherché en vain la comète à l'origine de l'essaim.

Finalement, c'est le 11 Octobre 1983 que le satellite IRAS découvre un astéroïde, répertorié 1983 TB et par la suite dénommé 3200 Phaeton, se déplaçant pratiquement sur la même orbite que l'essaim. L'identification de l'astéroïde 3200 Phaeton comme étant probablement à l'origine de l'essaim météoritique des Géminides a été faite en premier par Whipple (en 1983), confirmée par Gustavson (en 1989), Williams et Wu (en 1993). Au lieu de résoudre le problème de l'origine de l'essaim, la découverte provoqua la surprise chez les astronomes et amplifia le mystère.

3200 Phaeton, un astéroïde de type Apollo, est catalogué comme potentiellement dangereux puisqu'il peut s'approcher de la Terre à une distance de seulement 8 fois la distance Terre-Lune. Mais s'agit-il réellement d'un astéroïde ? Il est en effet très rare qu'un astéroïde laisse des débris dans l'espace. Il est probable que 3200 Phaeton soit en fait une comète éteinte ou inactive, usée par ses passages répétés dans la banlieue du Soleil. Depuis sa découverte, 3200 Phaeton n'a toujours pas montré d'activité... et l'énigme reste entière.

Période d'activité : 04 au 17 Décembre Maximum : 13 Décembre

Longitude solaire (λ) : 262.2°

position du radiant au moment du maximum
ascension droite (alpha) : 112° déclinaison (delta) : +33°
Vitesse (en km/s) : 35 r : 2.6 ZHR : 120
Comète associée : 3200 Phaeton (astéroïde)

Coma Bérénicides (COM)

Le radiant de l'essaim des Coma Bérénicides (COM) est situé à environ 10 degrés au nord de la brillante étoile Denebola (*beta Leonis*) de la constellation du Lion. Le taux horaire moyen (ZHR) au moment du maximum est d'environ 3 météores par heure. Avec une vitesse d'environ 65 km par seconde, les météores sont très rapides.

La découverte de cet essaim météoritique vient du résultat des recherches d'essaims parmi les météores détectés par photographie durant le Harvard Meteor Project de 1952-1954. La première mention de l'existence de cet essaim a été faite par R. E. McCrosky et A. Posen en 1959. En 1973, A. F. Cook, B.-A. Lindblad, B. G. Marsden, McCrosky, et A. Posen isolèrent sept photographies de météores de la même collection de météores par Harvard, qui indiquaient un autre essaim que les Leo Minorides de Décembre. Ils notèrent que les orbites présentaient une forte ressemblance avec celles des Coma Berenicides de Janvier. En effet, les orbites des deux essaims sont si semblables que leur existence mutuelle ne peut être le fruit du hasard.

Ce qui rend cet essaim météoritique mineur spécialement intéressant est la similarité de son orbite avec l'orbite d'une comète non confirmée qui a été rapportée en 1912-1913. La comète a été officiellement désignée 1913 I et a été découverte dans les premières heures du 30 Décembre 1912, par B. Lowe, un astronome amateur dans le Sud de l'Australie. Lowe a réussi à poursuivre les observations le 02, 04, 05 et 09 Janvier, avant que la comète disparaisse dans les lueurs matinales. Toutefois, une malheureuse erreur de position dans l'annonce de Lowe par télégramme, lequel a été envoyé à l'Observatoire d'Adélaïde le 07 Janvier, a eu pour conséquence que les recherches entreprises les 08 et 11 Janvier n'ont rien révélé. Avec quatre positions qui pouvaient être déduites des observations approximatives de Lowe, A. C. D. Crommelin et M. Viljev ont pu calculer indépendamment des orbites presque identiques, excepté une variation de 40 degrés dans l'inclination de l'orbite.

La première mention de cette curieuse relation a été faite en 1954 par Fred L. Whipple. Dans un article présentant 144 orbites de météores photographiés obtenues de 1936 à 1951, par les appareils-photo du Harvard College Observatory, Whipple a identifié un météore avec une orbite semblable à celle de 1913 I, assez pour faire une association comète-météore "assez probable à part une incertitude dans l'inclination de l'orbite de la comète." Whipple a ajouté que "si les futures observations de météores confirment l'association, nous pouvons apprendre plus sur l'orbite de la comète Lowe par les études de météores que par ce que nous pouvons glaner de l'observation directe." La suggestion que les Coma Berenicides seraient associés à la comète Lowe a été également suggérée par McCrosky et Posen en 1959.

Période d'activité : du 12 au 23 Décembre Maximum : 15 Décembre
Longitude solaire (lambda) : 264°
position du radiant au moment du maximum
ascension droite (alpha) : 175° déclinaison (delta) : +18°
Vitesse (en km/s) : 65 r : 3.0 ZHR : 3

December Leonis Minorids (DLM)

Les December Leonis Minorids (DLM) sont actives d'un radiant situé à l'est de Leo Minor, à dix

degrés au nord-est de l'étoile Zeta Leonis. Le maximum d'activité se produit vers le 20 Décembre, avec des taux actuels d'environ un météore par heure depuis l'hémisphère nord et moins d'un par heure depuis l'hémisphère sud. Avec une vitesse de 64km/s, l'essaim produit essentiellement des météores rapides.

Les récentes données par vidéo obtenues sur plusieurs années ont permis de bien faire la distinction entre l'essaim des Coma Bérénicides (COM) et celui des December Leonis Minorids (DLM).

Période d'activité : du 05 Décembre au 04 Février Maximum : 19 Décembre

Longitude solaire (λ) : 268°

position du radiant au moment du maximum

ascension droite (α) : 161° déclinaison (δ) : +30°

Vitesse (en km/s) : 64 r : 3.0 ZHR : 5

Comète associée : C/1798 X1 (Bourvard) ?

Ursides (URS)

Le radiant des Ursides (URS) est situé près de l'étoile Kochab de la Petite Ourse (*Ursa Minor*). Les météores ont une vitesse d'environ 33 km par seconde. Le taux horaire moyen (ZHR) est de 10 météores par heure au moment du maximum, mais occasionnellement, le ZHR peut atteindre 50 météores par heure. Plusieurs sursauts majeurs d'activité se sont produits dans les soixantes dernières années, notamment en 1945 et 1986, et certaines années avec des taux moindres, comme en 1988, 1994 et 2000.

Les Ursides sont associés à la comète Méchain, désormais nommée 8P/Tuttle. Découverte par Pierre Méchain en 1790, cette comète a été redécouverte par Horace Parnell Tuttle en 1858 qui note une forte ressemblance avec la comète de 1790 après calcul des éléments orbitaux. Karl Christian Bruhns découvre également la comète quelques jours après Tuttle. Découverte à nouveau en 1871 par Alphonse Louis Nicolas Borrelly, par Friedrich August Theodor Winnecke, puis par Tuttle. la comète a été revue à chacun de ses retours, excepté en 1953.

Période d'activité : du 17 au 26 Décembre Maximum : 22 Décembre

Longitude solaire (λ) : 270.7° position du radiant au moment du maximum

ascension droite (α) : 217° déclinaison (δ) : +76°

Vitesse (en km/s) : 33 r : 3.0 ZHR : 10

Comète associée : [8P/Tuttle](#) (période de 13.5 ans)

Visibilité des planètes

Mercure : visible à l'aube vers le 25 décembre (Sco, oph)

Vénus : visible à la tombée de la nuit premier quartier (Sgr,cap)

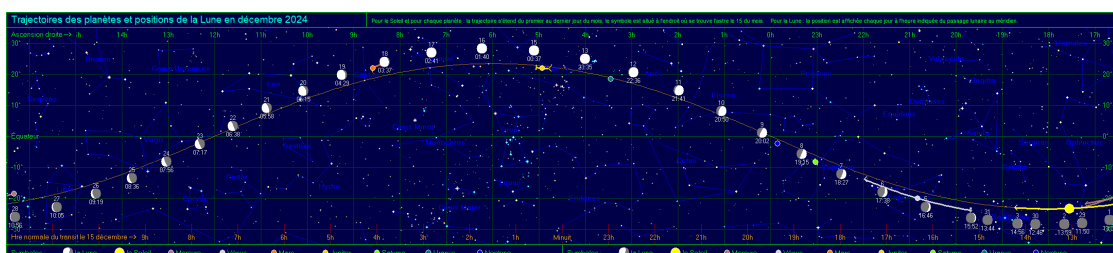
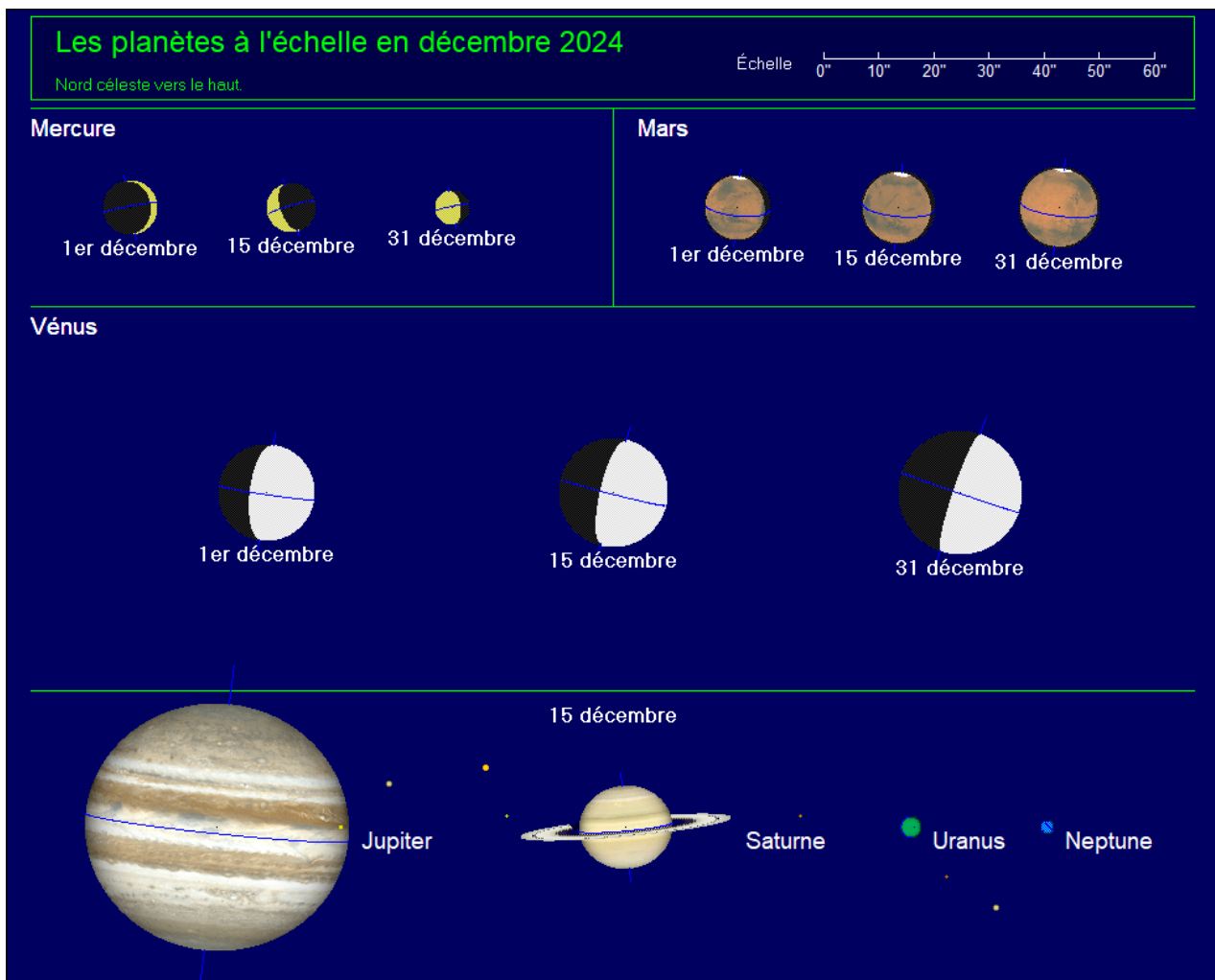
Mars : visible en seconde partie de nuit avant son opposition (Cnc)

Jupiter : bien visible quasiment toute la nuit (Tau)

Saturne : visible en début de nuit (Aqr)

Uranus : observable toute la nuit (Tau)

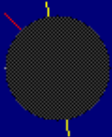
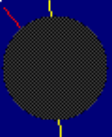
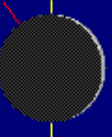
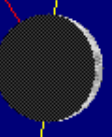
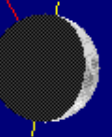
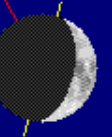
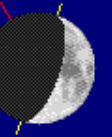
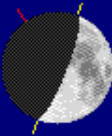
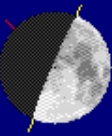
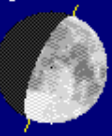
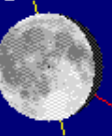
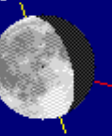
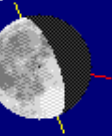
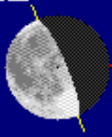
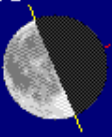
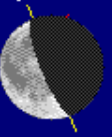
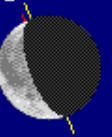
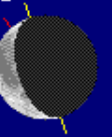
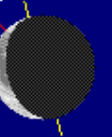
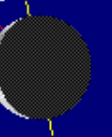
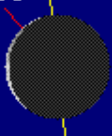
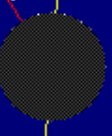
Neptune : visible en début de nuit (Poissons)

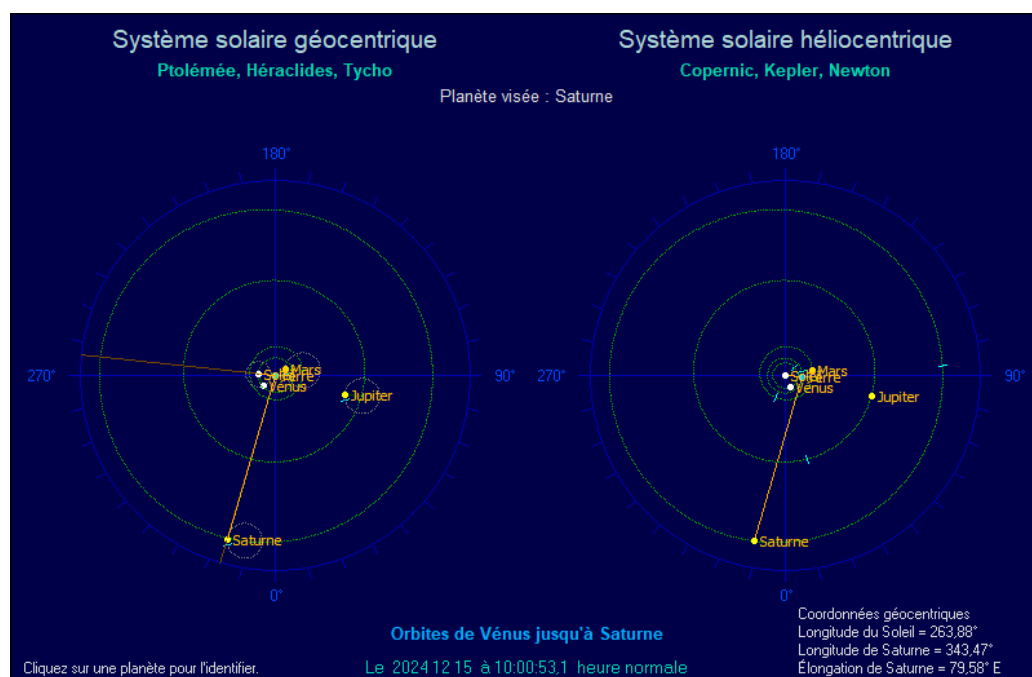


Phases lunaires pour décembre 2024

Les phases sont affichées pour 0 h, heure normale de Nantes. Les traits jaunes indiquent l'orientation des pôles lunaires.

Le trait rouge montre la direction de la libration. Sa longueur est proportionnelle à l'intensité de la libration. Le Nord lunaire est vers le haut.

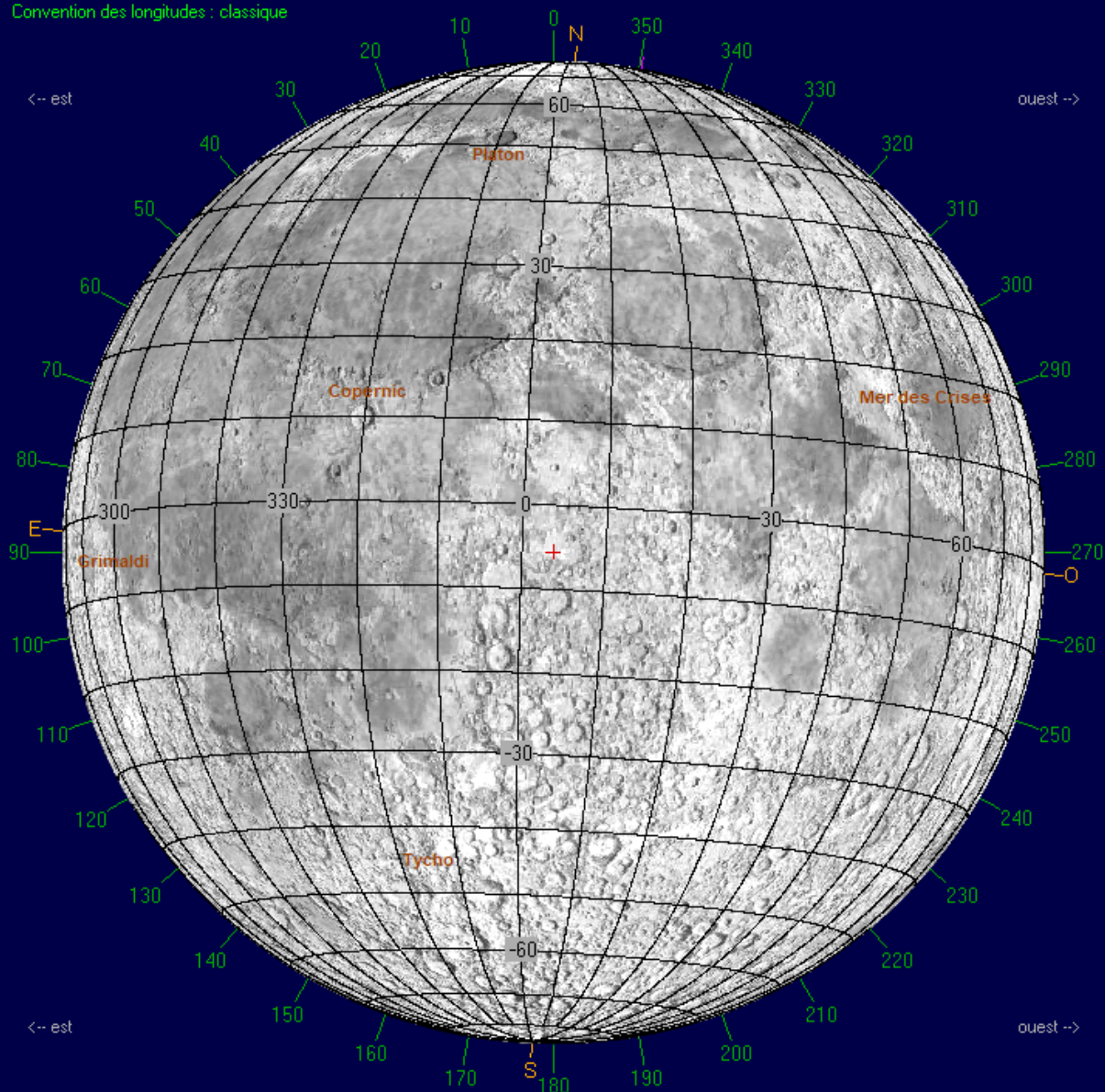
Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi
1  NL à 07:21 HN	2 	3 	4 	5 	6 	7 
8  PQ à 16:27 HN	9 	10 	11 	12 	13 	14 
15  PL à 10:02 HN	16 	17 	18 	19 	20 	21 
22  DQ à 23:18 HN	23 	24 	25 	26 	27 	28 
29 	30  NL à 23:27 HN	31 				



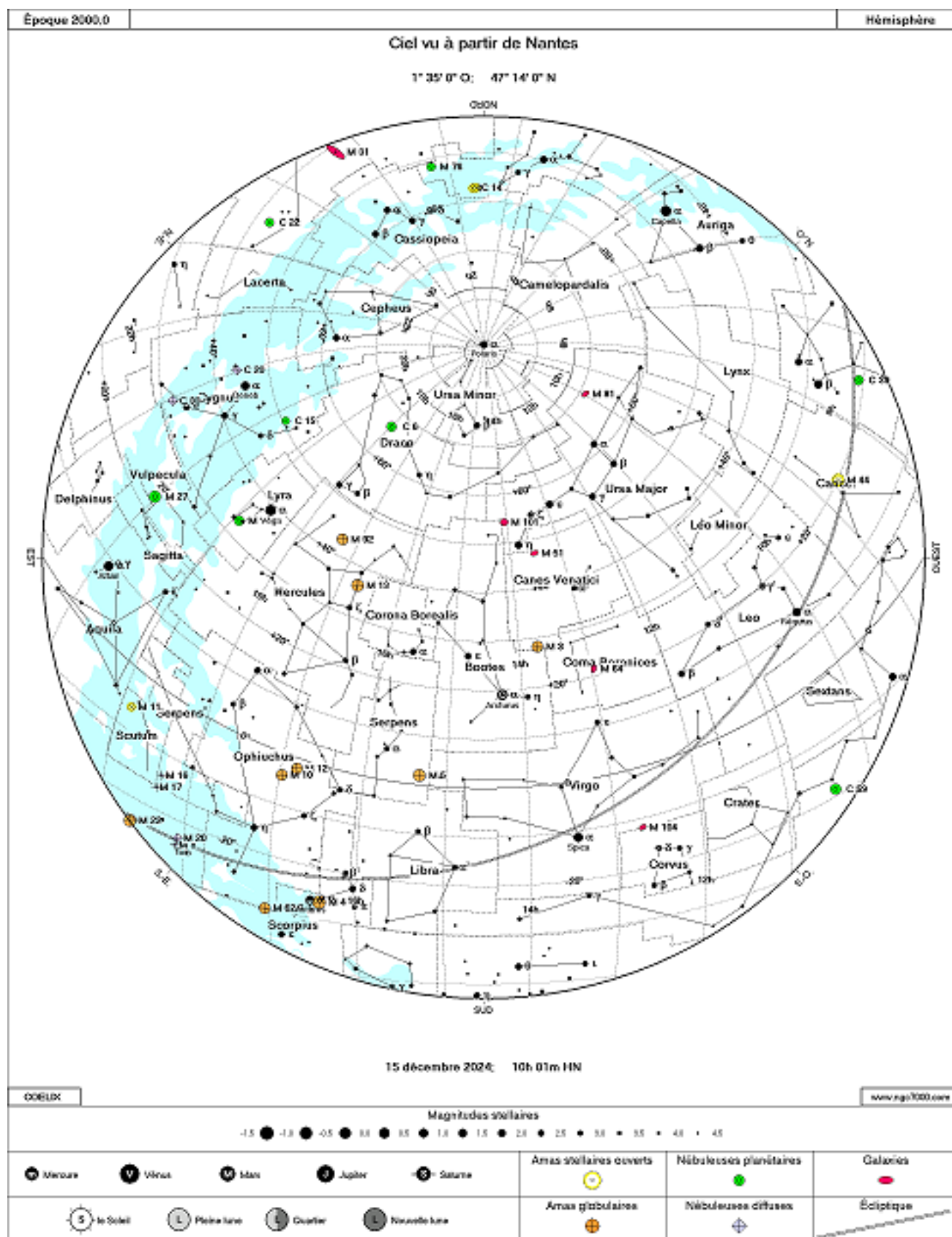
Carte de la Lune (vue topocentrique)

Angle de position du pôle Nord = $357,47^\circ$
 Angle de position du limbe éclairé = $349,74^\circ$
 Pourcentage d'illumination = 99,87%
 Convention des longitudes : classique

Longitude sélénographique du centre du disque = $3,81^\circ$
 Latitude sélénographique du centre du disque = $-5,60^\circ$
 Longitude du terminateur du soleil levant = $274,35^\circ$



CARTE DU CIEL



Comment utiliser la carte du ciel : si par exemple vous observez vers l'ouest, tenez la carte devant vous en plaçant le mot ouest vers le bas. Les constellations dessinées au-dessus de l'horizon Ouest vous font face sur le ciel. Le centre de la carte correspond au zénith, le point situé au-dessus de votre tête. Une constellation représentée à mi-distance du centre et du bord de la carte est donc à égale distance de l'horizon et du zénith.

Cours élémentaire d'astronomie et d'astrophysique

Georges Paturel, Observatoire de Lyon

VIII- Les étoiles mystérieuses.

Résumé : *Ce n'est que vers les années 1930, que l'on a compris d'où les étoiles tiraient leur énergie. Nous essayons de comprendre la démarche qui a conduit les astronomes à penser que seule l'énergie nucléaire pouvait expliquer le rayonnement des étoiles.*

Introduction

Lors du chapitre précédent, chapitre assez difficile si vous vous souvenez bien, nous avons montré comment les physiciens et les astronomes ont pu comprendre quantitativement les spectres stellaires.

Ces spectres portent une information extraordinaire sur la composition des astres et sur leurs mouvements. Mais un problème crucial se pose encore : d'où les étoiles tirent-elles leur énergie ?

Petit rappel sur les unités et sur les notations

Une puissance est une énergie par unité de temps. Une puissance est donc mesurée en joule par seconde. On appelle cette unité le watt. Une étoile envoie de l'énergie. En une seconde une étoile envoie une certaine quantité d'énergie dans toutes les directions. On dit qu'elle rayonne une certaine puissance. C'est sa luminosité.

Nous aurons à manipuler des nombres très grands. Nous les noterons avec les puissances de dix, comme nous l'avons fait souvent. 3×10^{26} signifie 3 suivi de 26 zéros. On a ainsi, par ex. : $(3 \times 10^{10})(2 \times 10^{12}) = 6 \times 10^{22}$

Les savants avaient compris que l'âge du Soleil et de la Terre était de plusieurs milliards d'années. Pour preuve, il y avait les fossiles, la salinité des mers, l'évolution géologique. Pendant tout ce temps, le Soleil rayonnait avec une puissance considérable. Il est facile de calculer cette puissance en mesurant l'énergie reçue sur Terre à chaque seconde pour une surface donnée. Connaissant la distance Terre-Soleil on peut calculer combien de mètres carrés sont ainsi "arrosés" d'énergie. Le résultat est spectaculaire : de l'ordre du milliard de milliards de milliards de watts. Cette mesure, assez simple à effectuer, a été proposée il y a bien longtemps dans les Cahiers Clairaut.

Refaisons le calcul brièvement.

On peut mesurer que chaque mètre carré sur la Terre, bien exposé au Soleil, reçoit environ 1 000 joules par seconde. La puissance reçue est de 1 000 watts par mètre carré. C'est l'équivalent d'un bon radiateur électrique. On note au passage que sur un toit de maison il y a largement de quoi se chauffer. Or le Soleil est à 150 millions de kilomètres de la Terre. Donc, chaque mètre carré de la sphère de rayon $R = 150 \text{ Mkm}$ centrée sur le Soleil reçoit 1 000 watts. Si vous calculez le nombre de mètres carrés ($S = 4\pi R^2$) vous trouvez $S = 3 \times 10^{23} \text{ m}^2$. Donc la puissance que doit fournir le Soleil pour envoyer toute cette énergie à tous ces mètres carrés à chaque seconde est de : $1\,000 \times 3 \times 10^{23} = 0,3 \times 10^{27}$, soit 0,3 milliard de milliards de milliards de watts.

Si le Soleil brûlait un combustible comme le méthane, dans une combustion classique avec de l'oxygène, quelle serait sa durée de vie ? En adoptant approximativement une énergie de dix millions de joules par kilogramme, on trouve qu'une masse comme celle du Soleil ($2 \times 10^{30} \text{ kg}$)

pourrait fournir les 3×10^{26} watts pendant 70 milliards de secondes, c'est-à-dire 2 000 ans. Ce n'est donc pas là l'origine de cette mystérieuse énergie.

Une autre solution fut imaginée par Helmholtz et Kelvin. Le Soleil s'effondrerait sur lui-même, transformant son énergie potentielle en chaleur, permettant ainsi au Soleil de rayonner. Le Soleil est si gros, qu'une faible contraction suffit à produire une puissance considérable.

Essayons de faire le calcul approximativement, pour voir si nous retrouvons les résultats de Helmholtz et Kelvin.

L'énergie que libère une masse s'effondrant sous son propre poids peut se calculer. Le calcul n'est pas élémentaire, mais nous nous contenterons d'un simple ordre de grandeur. L'énergie gravitationnelle libérée est égale à $E = 2GM^2/R$. Nous ne démontrerons pas cette relation que nous admettrons telle quelle. M est la masse du Soleil, R son rayon actuel et G la constante de la gravitation. Nous rappelons que, si nous exprimons les masses en kilogrammes, les énergies en joules, les longueurs en mètres et les temps en secondes, G vaut $6,67 \cdot 10^{-11}$ (en unités de ce système international). On trouve alors que pour le Soleil, l'énergie totale libérée depuis sa formation, par le simple fait de sa contraction gravitationnelle est de 8×10^{41} joules. Si je divise par la puissance rayonnée par le Soleil (en supposant qu'il a toujours rayonné de la même manière), je vais trouver le nombre de secondes de rayonnement. Nous avons dit que le Soleil rayonne 3×10^{26} watts, donc il a pu le faire ainsi pendant : $8 \times 10^{41} / (3 \times 10^{26}) = 3 \times 10^{15}$ secondes, c'est-à-dire : 95 millions d'années. Helmholtz et Kelvin avaient trouvé 100 millions d'années. C'est indiscutablement une source d'énergie importante, mais là encore, la durée de vie est très inférieure à ce qu'il faut pour expliquer le rayonnement de notre Soleil. Ce n'était donc pas la solution à cette énigmatique source d'énergie.

Équivalence masse et énergie

Einstein a énoncé une relation étonnante $E = m.c^2$. Cette relation montre l'équivalence entre énergie et masse. Si cette énergie peut se libérer, et nous verrons comment cela peut se faire naturellement, la masse est alors une source gigantesque d'énergie, propre peut-être à alimenter une étoile pendant des milliards d'années.

Nous avons présenté une des démonstrations originales de cette relation emblématique dans le n° 111 des CC (voir « [Démonstration de \$E = mc^2\$](#) » p. 29). Elle ne faisait appel qu'à des notions qui existaient avant sa fameuse théorie de la relativité restreinte (aberration de la lumière, pression de radiation et conservation de la quantité de mouvement). D'ailleurs, lors de notre dernière Assemblée Générale à Rouen, notre ami R. Cavaroz, nous a signalé un fait intéressant : la célèbre relation avait déjà été établie par P. Langevin. L'idée était dans l'air, la masse est un formidable réservoir d'énergie : du concentré d'énergie. Calculons l'énergie d'un kilogramme. $E = m.c^2$ conduit à $E = 9 \times 10^{16}$ joules. C'est 10 milliards de fois plus d'énergie que ce que fournirait la même masse du mélange méthane oxygène. Le Soleil pourrait vivre 20 000 milliards d'années en convertissant toute sa masse en énergie.

Mais nous allons voir que toute la masse n'est pas convertie. Mais une toute petite fraction seulement de cette masse suffit amplement à faire vivre notre Soleil, confortablement.

Les réactions nucléaires

L'observation des spectres a montré aux astronomes que l'hydrogène, cet élément d'une grande simplicité (un électron tournant autour d'un proton), est présent partout. La masse volumique des étoiles (que les astronomes appellent abusivement la densité), montre que les étoiles sont essentiellement faites d'hydrogène et d'hélium avec des traces d'éléments chimiques plus lourds. Peut-on imaginer que l'hélium, qui a une masse environ quatre fois plus grande que celle d'un atome d'hydrogène, est fabriqué à partir de quatre atomes d'hydrogène. Si c'était ainsi, quel serait le bilan énergétique de cette fabrication. Absorberait-elle de l'énergie ou au contraire en libérerait-elle ? Essayons de le calculer.

La masse atomique d'un atome d'hydrogène est de 1,008 13 g par mole (une mole est un pa-

quet de 6×10^{23} atomes vrais). Donc quatre atomes d'hydrogène ont une masse de 4,032 52 g (toujours par mole). Or un atome d'hélium a une masse de 4,003 89 g. Donc, les quatre atomes d'hydrogène donnent un atome d'hélium et il reste 0,028 62 g. Si cette petite différence de masse est convertie en énergie, à chaque fabrication d'un atome d'hélium, il se libère une énergie de :

$$\frac{0,028\ 62 \times 10^{-3}}{6 \times 10^{23}} (3 \times 10^8)^2 = 4,3 \times 10^{-12} \text{ joules}$$

Vous avez reconnu la relation $E = m.c^2$, avec la masse convertie en kg par atome vrai et la vitesse de la lumière en m/s.

On peut se demander quelle masse d'hydrogène doit être convertie en hélium pour produire le rayonnement actuel du Soleil. Nous avons vu qu'à chaque seconde le Soleil fournit 4×10^{26} joules puisque sa puissance est de 4×10^{26} watts.

Ce n'est pas compliqué. Il faut fabriquer à chaque seconde $(4 \times 10^{26}) / (4 \times 10^{-12})$ atomes vrais d'hélium.

Et il faut donc convertir 4 fois plus d'atomes d'hydrogène, c'est-à-dire environ 4×10^{38} atomes d'hydrogène par seconde. Sachant que 6×10^{23} atomes d'hydrogène ont une masse de 1,008 13 g, on trouve aisément que le Soleil convertit, à chaque seconde, une masse de : 666 milliards de kilogrammes d'hydrogène (en gros 700 millions de tonnes par seconde) en hélium. Cette valeur nous paraît énorme. Mais pour le Soleil, ce n'est presque rien, la masse du Soleil étant, rappelons-le, de 2×10^{30} kg. Nous allons calculer la durée de vie du Soleil si nous nous basons sur ce mécanisme de conversion hydrogène en hélium. Nous allons supposer que seulement la moitié de la masse du Soleil est transformée en hélium, car nous verrons plus tard que d'autres mécanismes entrent en jeu, qui vont modifier le déroulement simple du processus. Le calcul est simple :

$$\frac{1}{2} \times \frac{2 \times 10^{30}}{666 \times 10^9} \approx 1,5 \times 10^{18} \text{ s}$$

C'est-à-dire environ 48 milliards d'années. On est totalement rassuré, notre Soleil a de la réserve pour briller encore longtemps comme aujourd'hui.

Comment convertir l'hydrogène en hélium

Le mécanisme que nous venons de voir a été proposé dans les années 1930. Vous notez au passage que la compréhension du rayonnement des étoiles est très récente, puisque les plus vieux de nos lecteurs sont nés quand on ne savait pas encore expliquer d'où provenait la mystérieuse énergie des étoiles.

Nous avons le mécanisme, mais il nous manque encore un détail. Comment cette transformation se fait-elle ? En effet, pour faire fusionner quatre atomes d'hydrogène ce n'est pas facile. Les noyaux de ces atomes sont des protons, chargés positivement. Quand les protons arrivent l'un près de l'autre ils se repoussent énergiquement. Quelle force peut bien les contraindre à fusionner ?

On peut dire que c'est le mécanisme de Helmholtz et Kelvin qui joue le rôle d'amorce. Le nuage d'hydrogène primordial se contracte sous l'effet de la gravitation. Une énergie considérable est libérée qui chauffe le gaz à un point tel que les protons acquièrent une grande vitesse d'agitation. Quand la température et les vitesses sont suffisantes, les protons peuvent fu-

sionner. Les réactions nucléaires peuvent commencer. Ces réactions se produisent à quelques millions de degrés.

La gravitation devrait continuer de concentrer l'étoile, mais l'énergie générée au cœur de l'étoile naissante produit une pression qui freine et empêche la contraction. L'étoile est stable et la fusion se propage vers la périphérie, le cœur de l'étoile étant fait maintenant d'hélium. Pour être un peu plus précis, la transformation hydrogène en hélium passe par des étapes intermédiaires, plus faciles à réaliser, mais le bilan est le même, quatre atomes d'hydrogène donnent un atome d'hélium. C'est le mécanisme que les hommes aimeraient pouvoir produire sur Terre de manière contrôlée, le fameux projet **ITER**. C'est bête, mais les hommes ont d'abord su exploiter ce mécanisme, de manière non contrôlée, pour faire des bombes, ce qu'on appelle les bombes « H ».

Le cœur des étoiles est très chaud, mais nous ne voyons que la partie superficielle, ce que l'on appelle l'atmosphère de l'étoile, dont la partie profonde et chaude est vue à travers les couches superficielles plus froides. Nous comprenons pourquoi des raies spectrales sont visibles.

IX- Les étoiles vivent

Résumé : *Comment a-t-on pu comprendre l'évolution des étoiles, cette évolution qui s'étend sur des millions, voire des milliards d'années ? Les astronomes ne vivent pas assez vieux pour suivre la vie d'une étoile, mais les lois universelles de la physique permettent de combler cette impossibilité physique.*

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que la seule source d'énergie possible pour expliquer le rayonnement des étoiles était la fusion nucléaire. Mais en ayant compris cela, nous n'avons pas compris, dans le détail, le fonctionnement d'une étoile, car la réalité est très complexe. Il a fallu attendre l'avènement des premiers ordinateurs pour commencer à reproduire la complexité de la vie d'une étoile.

Dans ce chapitre nous allons essayer de comprendre les grandes lignes de l'évolution stellaire, avec un peu de physique.

Qu'y avait-il précisément à comprendre ? Vers les années 1912, deux astronomes, Hertzsprung et Russel, construisirent, indépendamment l'un de l'autre, un diagramme en portant, indirectement¹⁷, la couleur des étoiles sur l'axe horizontal et la magnitude absolue sur l'axe vertical. Qu'est-ce donc que la magnitude d'une étoile et qu'est-ce donc que la couleur d'une étoile ?

Magnitude et magnitude

Commençons par définir la magnitude d'une étoile. Si vous ne savez pas ce qu'est une magnitude, vous ne pouvez pas l'inventer, car il s'agit d'une définition : la magnitude apparente d'une étoile est une mesure de son éclat apparent dans une échelle logarithmique. L'éclat apparent est l'énergie que vous envoie l'étoile par unité de temps (on appelle ça une puissance) et par unité de surface. En prenant le logarithme de cet éclat apparent, on définit une échelle logarithmique. Pour retrouver la classification ancienne, classification dans laquelle les étoiles les plus brillantes étaient dites de grandeur 1 et les étoiles faibles de grandeur 6 (ou plus), il fut proposé en 1856 par N.R. Pogson, que la magnitude apparente soit définie comme :

$$m = -2,5 \log E + cste$$

E est l'éclat apparent mesuré et C une constante arbitraire adoptée une fois pour toutes, selon les unités adoptées pour E. Le fait, vous l'avez compris, pour d'éclat le plus important cor- plus petite grandeur, car le lo- fonction monotone croissante, comme disent les mathématiciens, plus x est grand plus $\log x$ l'est aussi.

$$m - M = 5 \log d - 5$$

signe moins est que les étoiles répondent à la garithme est une

Il est important de remarquer que cette magnitude apparente ne nous renseigne pas sur la luminosité intrinsèque d'une étoile, car deux étoiles peuvent avoir la même magnitude apparente et ne pas avoir la même luminosité si leurs distances sont différentes. Les astronomes ont inventé une nouvelle définition pour mesurer la luminosité intrinsèque d'une étoile. C'est la magnitude absolue M , qui, par définition, est la magnitude apparente qu'aurait l'étoile si elle était à une distance fixe de 10 parsecs (32,61 années de lumière). Comme l'éclat E varie comme l'inverse du carré de la distance, il est facile de montrer que

: d est la distance mesurée en parsec (1 pc = 3,26 a.l.). Vous voyez donc que, quand on connaît $m - M$, on connaît la distance. Cette quantité est appelée le *module de distance* et on la note souvent par la lettre grecque m .

Nous avons supposé implicitement que m et M étaient définies sur l'ensemble du spectre lumineux (toutes les longueurs d'onde). En pratique, les mesures ne sont effectuées que sur un domaine du spectre. On caractérise ce domaine par une longueur effective λ . On définit donc une magnitude m_λ (ou M_λ) pour un domaine de longueur d'onde donné. Vous allez voir que ceci est important pour définir une couleur d'étoile.

Indice de couleur d'une étoile

L'indice de couleur (ou plus brièvement, la couleur) est définie en astrophysique comme la différence des magnitudes à deux longueurs d'onde différentes. Par exemple, les astronomes utilisent la couleur notée $B - V$, différence entre la magnitude apparente en "bleu" à la longueur d'onde approximative de 450 nm et la magnitude apparente dans le domaine "visible" à 550 nm. Mais on peut définir une infinité de couleurs. On utilise souvent la couleur $U - B$, différence des magnitudes en ultraviolet (350 nm) et en bleu (550 nm). En allant vers l'infrarouge on rencontre aussi l'indice de couleur $V - I$ (visible à 550 nm moins infrarouge à 800 nm), etc.

Remarquons qu'une couleur est invariante avec la distance puisque l'effet de distance affecte les deux magnitudes de la même façon. La couleur est une propriété intrinsèque de l'étoile (après correction éventuellement de l'effet d'absorption par de la poussière interstellaire qui affecte plus un domaine de longueur d'onde qu'un autre).

Couleur et température effective

On peut assimiler les étoiles à des corps noirs parfaits et calculer la couleur $B - V$ pour différentes températures en utilisant l'équation du corps noir donnée par la relation de Planck. Exprimée en magnitude à la longueur d'onde effective λ elle s'écrit (à une constante près) :

$$m = -2,5 \log \left[\frac{1}{\lambda^5} \left(\exp \left(\frac{h c}{\lambda K T} \right) - 1 \right)^{-1} \right]$$

Avec $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$, $c = 2,99792 \cdot 10^8$, en unités S.I.. On fera le calcul pour T entre 2 000 K et 10 000 K, pour 450 nm (B) et 550 nm (V). Bien que la relation ne soit pas linéaire, elle est bien approximée par :

$$\log T = 3,79 - 0,43 (B - V)$$

La couleur $B - V$ est approximativement une mesure de température effective.

Retour sur le diagramme HR

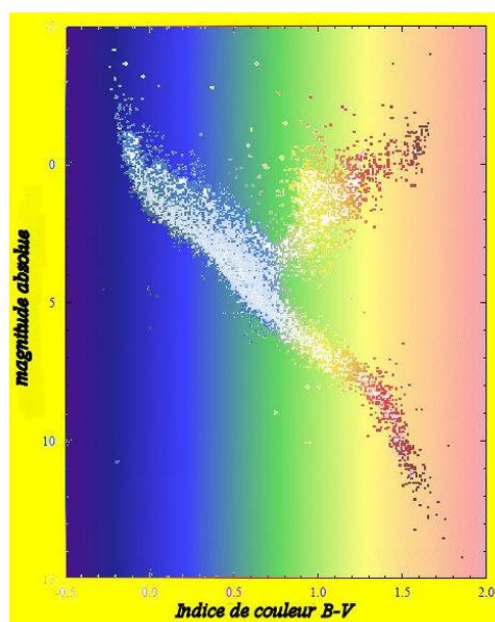
Maintenant que les bases ont été définies, revenons sur le diagramme de nos deux astronomes Hertzsprung et Russel. On parle généralement de diagramme HR, c'est plus simple à dire.

Tout d'abord, éclaircissons le point historique. Hertzsprung, le premier, avait tracé un diagramme en prenant la magnitude apparente des étoiles d'un amas en fonction de leur couleur. Comme, toutes les étoiles d'un amas sont à la même distance (vu de Lyon, tous les habitants de Paris sont à la même distance), la magnitude apparente est, à un terme constant près, une mesure de la magnitude absolue. Donc pour un amas, le diagramme était bien un diagramme magnitude absolue - couleur, à un décalage en ordonnée près.

Russel, lui, avait considéré les étoiles du voisinage solaire de magnitude absolue connue (par les estimations de distance et la magnitude apparente). Ces mêmes étoiles avaient été classées d'après les caractéristiques de leur spectre. Cette classification spectrale s'est révélée être une classification de température, donc de couleur $B - V$ (voir encadré).

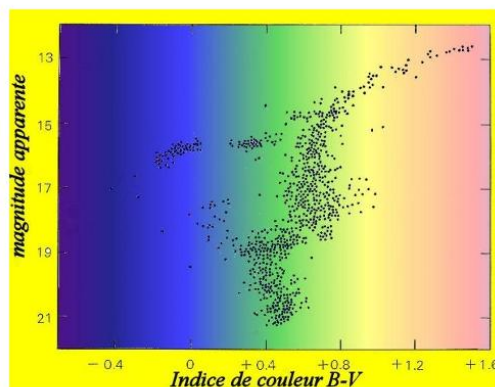
Finalement le diagramme HR est bien un diagramme Magnitude absolue - Couleur (ou Luminosité - Température).

Le problème se posait alors ainsi : pourquoi les étoiles du voisinage solaire ne se situent qu'en certaines régions du diagramme et pourquoi les étoiles d'amas obéissent à des distributions différentes ?



D'après ESA- HIPPARCOS

Diagramme HR pour les étoiles du voisinage solaire mesurées par le relevé HIPPARCOS.



D'après un diagramme de H. Arp

Diagramme HR typique pour les étoiles d'un amas.

Température intérieure

La première chose à vérifier est que la température intérieure d'une étoile est assez élevée pour permettre la fusion nucléaire des noyaux d'hydrogène. Vous vous rappelez en effet que c'est la seule source d'énergie capable d'expliquer la longévité d'une étoile.

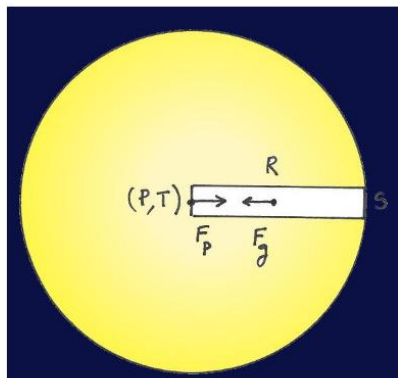
Nous empruntons la démonstration très simple à Martin Schwarzschild¹⁸. Quand je dis très simple, il faut normalement utiliser le calcul différentiel. Mais nous allons simplifier encore en essayant de ne pas trop dénaturer le calcul.

Nous allons considérer un volume cylindrique de section S et de masse m , qui s'étend du cœur de l'étoile à la périphérie (voir le schéma). Ce tube a pour longueur le rayon de l'étoile et son volume est $v = S.R$. Il est poussé vers l'extérieur de l'étoile par une force

$$F_p = P S$$

où P désigne la pression au centre de l'étoile. La pression sur l'autre face du cylindre est nulle.

¹⁸ Fils de Karl Schwarzschild qui trouva la solution des équations d'Einstein dans le cas d'une symétrie centrale (cas applicable au Soleil).



Mais, chaque section du cylindre est attirée par toute la masse M qui est en direction du centre de l'étoile. En moyenne nous pourrions considérer que le cylindre est attiré par la moitié de la masse de l'étoile, $M/2$ (c'est une approximation simpliste, justifiée par le fait que la masse volumique doit être plus importante au centre qu'en surface). Nous allons désigner par ρ la masse volumique moyenne de l'étoile (masse divisée par volume) :

$$\rho = \frac{M}{\left(\frac{4}{3}\right)\pi R^3} \approx \frac{M}{4 R^3}$$

donc le cylindre est attiré vers le centre par une force gravitationnelle :

$$F_g = \frac{G M m}{(R/2)^2} = G \frac{(M/2)(S R \rho)}{(R/2)^2} = \frac{G S M^2}{2 R^4}$$

L'étoile étant stable, cela signifie que les deux forces antagonistes sont égales en module ($F_p = F_g$). On trouve alors immédiatement :

$$P = \frac{G M^2}{2 R^4}$$

Nous pouvons estimer l'ordre de grandeur de la pression au centre d'une étoile. En prenant l'exemple du Soleil¹⁹ ($M = 2 \times 10^{30}$ kg $R = 7 \times 10^8$ m).

On trouve que la pression au centre du Soleil est de $P = 6 \times 10^{14}$ N/m². Sur chaque mètre carré du centre du Soleil s'exerce une force de 600 000 milliards de newtons. C'est comme si, sur Terre, vous aviez une masse de 60 milliards de tonnes par mètre carré.

Bon, alors, et la température ! Il y a une loi de la physique, loi des gaz parfaits, qui dit que le produit de la pression par le volume d'une quantité de matière est proportionnel à la température absolue T de cette quantité de matière (la température absolue est celle de votre thermomètre, augmentée de 273 degrés. On la mesure en degrés kelvin, abrégés en K). On peut déduire de cette formulation une expression qui relie la pression, la masse volumique de la matière considérée et la masse μ_p d'une particule qui compose cette matière. Cette relation très classique en physique s'écrit (voir l'encadré) :

$$P = \frac{k}{\mu_p} \rho T$$

La constante de Boltzmann $k \approx 1,4 \times 10^{-23}$ dans le même système d'unité standard que précédemment μ_p est à peu près la masse d'un noyau d'hydrogène (un proton), mais il faut diviser par deux, car il y a aussi des électrons, en nombre égal, et qui ont une masse négligeable. En remplaçant dans l'expression précédente, la pression centrale et la masse volumique par leurs expressions vues plus haut, on tire l'expression de la température centrale :

$$T = 2 P \frac{\mu_p}{k} \frac{R^3}{M}$$

En appliquant cette relation au Soleil et avec $\mu_p = 1,7 \times 10^{-27}$ kg, on trouve $T = 25 \times 10^6$ K. C'est chaud, 25 millions de degrés. À cette température-là, il n'y a pas de problème pour réussir la fusion de l'hydrogène en hélium. C'est ainsi qu'on récupère une belle énergie, fort agréable sur la plage...

La loi des gaz parfaits

Expérimentalement on peut constater que le produit PV/T reste constant pour un gaz à la température T , à la pression P et de volume V . On sait par ailleurs (loi d'Avogadro) qu'un paquet de $N_0 = 6 \times 10^{23}$ particules (ce qu'on appelle une mole) occupe un volume de 0,022 4 m³ à la pression de 101 000 N.m⁻² (les N.m⁻² sont des pascals - abréviation Pa) et à la température de 0 °C = 273 K. On a donc pour les N_0 particules (1 mole) :

¹⁹ La constante de la gravitation universelle $G = 7 \times 10^{-11}$ dans le système des unités standards (m,kg,s).

$$\frac{PV}{T} = \frac{101\,000 \times 0,0224}{273} = 8,3 \text{ N.m.K}^{-1}.\text{mole}^{-1}$$

Notons que les "newton × mètre" = N.m sont des joules (abréviation J).

Par ailleurs, la masse de n moles de particules ayant une masse individuelle de μ_p est $n.N_0\mu_p$. Cette masse, divisée par le volume, définit la masse volumique :

$$\rho = \frac{n H_0 \mu_p}{V}$$

En reportant cette expression dans notre première relation écrite pour n moles on trouve alors :

$$P = \frac{8,3}{N_0 \mu_p} \rho T$$

La valeur $8,3/N_0 = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ se note k . C'est la constante de Boltzmann. Nous retrouvons bien l'expression utilisée dans le cours.

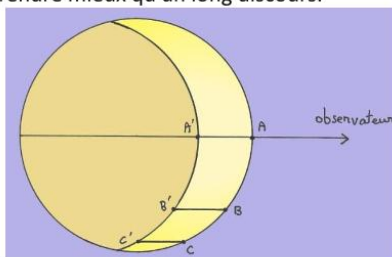
Ce n'est pas croyable où ça mène l'astronomie !

Preuve expérimentale

Nous avons trouvé que l'intérieur du Soleil est très chaud. La partie extérieure est bien plus froide, quelques milliers de degrés seulement ! On sait d'ailleurs mesurer cette température extérieure (voir « [Thermosecantahéliomètre](#) » dans CC n°6 page 3-11). On en conclut que la température augmente quand on s'enfonce dans les couches profondes. Peut-on le prouver expérimentalement ? Eh bien oui, et c'est très simple, même si on ne peut pas aller mesurer la température sur place. C'est l'observation de l'assombrissement du bord du Soleil.

L'astronome Foucault et son camarade d'étude Fizeau furent les premiers à photographier le Soleil en 1845 (voir « [Léon Foucault](#) » J.N Terry dans CC n° 113 p.20-24). Il apparut clairement que le bord du Soleil était plus sombre. Quelle était l'origine de cet assombrissement ?

Le schéma ci-dessous vous fera comprendre mieux qu'un long discours.



La profondeur optique d'où nous provient la lumière est à peu près constante $AA' = BB' = CC'$. Mais vous voyez sur le schéma que A' est plus profond que B', lui-même plus profond que C'. La lumière que nous observons au centre du Soleil provient, en moyenne, de régions plus chaudes.



Photo D. Bardin

Sur cette magnifique photo prise par Daniel Bardin lors du dernier passage de Vénus devant le Soleil, on devine bien l'assombrissement centre bord.

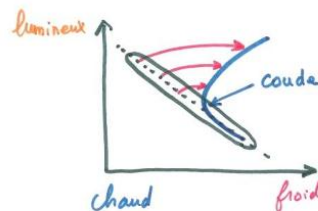
Formation des éléments

Nous sommes rassurés, car nous avons compris la source d'énergie des étoiles. Cette source est inépuisable... Pas exactement.

À partir de quatre atomes d'hydrogène, nous pouvons former un atome d'hélium. Cette réaction n'est pas directe. Elle passe par des étapes intermédiaires que nous ne détaillerons pas ici. Mais le résultat est que nous récupérons de l'énergie, de petites particules (neutrinos) et bien sûr de l'hélium. Quand le cœur de l'étoile ne sera composé que d'hélium les réactions se poursuivront vers la périphérie de l'étoile. Mais on peut imaginer que l'hélium à son tour puisse fusionner pour donner du carbone, que le carbone puisse fusionner pour donner de l'oxygène, etc. En principe ces mécanismes sont possibles, mais sous certaines conditions qui ne sont pas toujours satisfaites, selon la masse de l'étoile.

Peut-on tout calculer ? En principe oui. Les lois de la physique qui gouvernent la production d'énergie, son acheminement par rayonnement, par convection (brassage des différentes couches) ou conduction, ces lois sont connues, ou au moins bien représentées. Il n'y a pas moins de cinq équations différentielles à résoudre simultanément pour décrire l'évolution d'une étoile de masse et de composition chimique initiale données. Pour une description fine, il faut prendre en compte aussi les mouvements mécaniques et la perte de masse des étoiles. Vous concevez la complexité du problème. Avec l'avènement des ordinateurs, il a été possible de s'attaquer à ce gigantesque problème.

On découvre ainsi qu'une étoile comme le Soleil ne peut pas démarrer immédiatement les réactions nucléaires de fusion de l'hélium. Il faut d'abord que le cœur d'hélium se contracte pour augmenter la température à un niveau suffisant. Ce faisant, les couches externes seront soufflées et l'étoile va enfler pour devenir une étoile géante rouge (extérieur plus froid). Le point représentatif du Soleil, dans le diagramme HR dont nous parlions au début de l'article, se déplacera vers la droite (vers les étoiles froides) et vers le haut (vers les étoiles plus lumineuses). On découvre aussi que plus une étoile est massive plus tôt se fera ce passage de la zone principale du diagramme vers la zone des étoiles géantes.



L'âge des étoiles

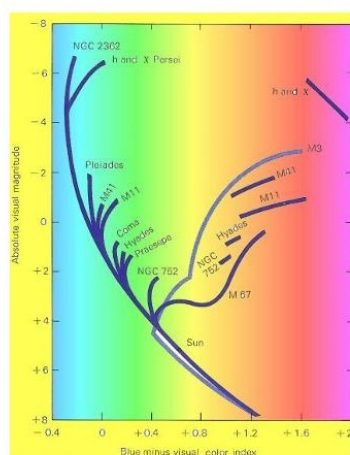
On commence à comprendre un peu le diagramme HR pour les étoiles du voisinage solaire. Toutes ces étoiles se sont formées par contraction d'un nuage primordial, mais elles n'ont pas commencé leur vie au même moment. Cependant, elles sont toutes arrivées dans la zone principale du diagramme HR pour y brûler leur hydrogène. Cette zone s'appelle la *séquence principale*. Là, elles y restent le temps d'épuiser leur combustible nucléaire. Pour les étoiles de faible masse, comme le Soleil, cette phase est très longue (quelques milliards d'années). Pour les étoiles massives, c'est plus court (enfin... quelques centaines de millions d'années tout de même). Pour les étoiles les plus massives, c'est très court, quelques millions d'années seulement.

Quand les étoiles quittent la séquence principale pour aller rejoindre la séquence des étoiles géantes, le processus est très rapide. C'est le cœur d'hélium qui se contracte d'abord (et nous avons vu dans le dernier chapitre que ce processus était rapide). Arrive ensuite la combustion de l'hélium, un second souffle pour les étoiles et une seconde pause dans le diagramme HR. On comprend donc pourquoi on n'observe pas d'étoiles sur toute la surface du diagramme. On n'observe les étoiles que là où elles demeurent assez longtemps.

Qu'en est-il du diagramme HR des amas d'étoiles ? Pourquoi un aspect différent du diagramme HR général ? La différence essentielle tient à ce que toutes les étoiles d'un amas naissent à peu près en même temps. Les étoiles demeurent physiquement proches les unes des autres. Si nous observons un diagramme d'amas qui vient juste de naître et qui n'a que quelques millions d'années, les étoiles sont toutes encore sur la séquence principale. C'est ce qu'on observe avec un amas jeune comme l'amas des Pléiades.

Si on prend un amas plus vieux, les étoiles massives auront déjà quitté la séquence principale, mais pas encore les étoiles peu massives. La séquence principale sera incurvée vers le haut. Si enfin on prend un amas très vieux, la courbure sera bien plus prononcée, seules les étoiles très peu massives seront encore sur la séquence principale. Nous venons de comprendre la diversité des diagrammes HR pour les amas stellaires.

Une conséquence importante est que la position du coude (voir le graphique) est un indicateur d'âge. On parvient, en comparant les diagrammes observés aux prévisions théoriques, à dater les amas. On trouve que les vieux amas ont plus de dix milliards d'années. Retenez bien ce résultat. Il aura une importance pour la suite de notre exploration.



D'après G. Abell, 1969

Diagramme HR pour différents amas stellaires.

Nous parlerons bientôt de la fin de la vie d'une étoile, fin calme ou catastrophique.

Bibliographie :

Schwarzschild M., 1958, Structure and Evolution of the stars, Dover

Bottinelli L., 1986, L'univers des étoiles, Gammaprim

17

La vérité historique est un peu plus compliquée. L'astronome danois Hertzsprung s'était amusé à comparer la magnitude apparente des étoiles d'amas à leur couleur, alors que l'astronome américain Russell avait comparé, pour les étoiles du voisinage solaire, leur magnitude absolue à leur type spectral (une classification basée sur l'aspect des spectres).

A SUIVRE

Les meilleures applications pour observer les étoiles dans n'importe quelles conditions

Vous avez envie de vous initier ou de faire découvrir l'astronomie à vos enfants ? Mais pas toujours facile de faire correspondre les emplois du temps de tout le monde, la météo et surtout les conditions idéales pour observer les étoiles.

[au sommaire](#)

- [SkySafari, la profondeur scientifique du bout des doigts](#)
- [Star Walk 2, l'interactivité au service de l'astronomie](#)
- [SkyView, un outil accessible et créatif](#)
- [Cartes du Ciel, une sobriété efficace à 360°](#)
- [Stellarium, une expérience immersive et éducative](#)
- [Starlight, une expérience conviviale et fluide](#)
- [Night Sky, l'innovation au cœur de l'astronomie](#)
-

La [pollution lumineuse](#), le ciel nuageux, et parfois le manque de connaissances des observateurs débutants constituent des obstacles parfois un peu compliqués à surmonter pour une initiation parfaite. Heureusement, des [applications](#) mobiles permettent de redécouvrir les [étoiles](#), même dans les environnements urbains et dans des conditions pas toujours optimales. Elles offrent des outils puissants pour identifier les [astres](#), comprendre leurs [mouvements](#) et rendre l'astronomie accessible à tous.

SkySafari, la profondeur scientifique du bout des doigts

Compatible [Android](#), [iOS](#) et macOS, SkySafari se distingue par sa richesse en données et sa précision scientifique. Ce n'est pas uniquement une application de cartographie du ciel : c'est un véritable guide d'exploration astronomique, idéal pour les amateurs éclairés et les [astronomes](#) en herbe. Grâce à la boussole et au GPS de votre téléphone, SkySafari est capable d'afficher à l'écran le ciel tel qu'il est au-dessus de votre tête lorsque vous le pointez vers celui-ci. L'affichage change lorsque vous bougez votre téléphone, un peu comme un système de réalité augmentée.



SKYSAFARI © SIMULATION CURRICULUM CORP.

Une des caractéristiques qui fait la force de SkySafari est sa capacité à simuler les cieux non seulement du présent, mais aussi du passé et du futur. Les utilisateurs peuvent ainsi explorer à quoi ressemblait le ciel à l'époque de [Galilée](#) ou anticiper des événements astronomiques comme des [éclipses solaires](#) ou lunaires.

Star Walk 2, l'interactivité au service de l'astronomie

Star Walk 2, quant à elle, met un point d'honneur à rendre l'observation des étoiles intuitive et visuellement agréable. En utilisant la réalité augmentée, cette application superpose une carte dynamique du ciel à l'environnement réel du spectateur, quel que soit le temps qu'il fait. À télécharger sur [smartphones](#) et [tablettes](#) Android, iPhone et iPad, mais aussi sur [Windows 10/11](#) depuis le [Microsoft Store](#).



STAR WALK 2 © VITO TECHNOLOGY INC.

L'interface de Star Walk 2 est immersive et fluide, avec des illustrations artistiques des [constellations](#) et une animation des corps célestes. L'application propose également des notifications pour ne pas manquer les événements majeurs, comme les pluies de [météores](#) ou les différentes [phases de la Lune](#). Bien que son approche soit davantage axée sur l'expérience utilisateur que sur des données techniques, Star Walk 2 reste un outil efficace pour apprendre et s'émerveiller. Et pour les plus jeunes, [une version Kids](#) est disponible.

SkyView, un outil accessible et créatif

SkyView s'adresse particulièrement à ceux qui cherchent une expérience d'observation simple, mais enrichissante. Avec son interface épurée, cette application utilise la réalité augmentée pour identifier instantanément les astres visibles en pointant simplement son smartphone vers le ciel, comme le font la plupart des applications de cette sélection. Mais SkyView se démarque aussi par ses fonctionnalités complémentaires et avancées, comme la possibilité de suivre les trajectoires des satellites de communication et de la [Station spatiale internationale](#) avec votre smartphone ou votre tablette Android, iPhone ou iPad.



SKYVIEW FREE © TERMINAL ELEVEN

Elle dispose également d'une impressionnante base de données d'astres et de corps célestes, déjà bien riche dans sa version gratuite, et comprenant plusieurs milliers d'étoiles supplémentaires dans sa version payante.

Cartes du Ciel, une sobriété efficace à 360°

Compatible tous les systèmes, Cartes du Ciel adopte une approche plus traditionnelle et académique, idéale pour ceux qui recherchent une application sans fioritures. Toujours avec ce système de réalité augmentée, vous pouvez pointer votre téléphone pour visualiser les constellations, même en plein jour, et si vous le pointez vers le sol, vous pourrez observer les étoiles de l'autre hémisphère.



CARTES DU CIEL - SKYCHART © AP-I

Cartes du Ciel mise aussi sur l'intérêt des astronomes en herbe pour les missions spatiales et notamment celles qui ont permis à l'Homme de marcher sur la Lune. Un mode "moment dans le temps" vous permet d'accompagner [Neil Armstrong](#) sur la Lune, de visualiser le module d'alunissage, de voir le clair de Terre, etc.

Stellarium, une expérience immersive et éducative

Stellarium est une des applications les plus connues et respectées dans le domaine de l'astronomie amateur, et pour cause. Cette application propose une vue immersive en 3D qui reproduit fidèlement le ciel [nocturne](#), avec des options pour observer les astres tels qu'ils apparaissent à différentes [latitudes](#) et périodes de l'année. Grâce à un moteur graphique puissant disponible sur tous les [systèmes d'exploitation](#), Stellarium offre une expérience visuelle époustouflante.



STELLARIUM © FABIEN CHÉREAU ET NOCTUA SOFTWARE

Outre son esthétique, Stellarium excelle en [matière](#) de pédagogie. Chaque objet visible est accompagné d'explications approfondies, idéales pour ceux qui souhaitent comprendre l'astronomie en profondeur. De plus, les fonctionnalités avancées, comme le suivi des satellites et les options de zoom détaillé, en font un outil précieux pour les observateurs chevronnés.

Starlight, une expérience conviviale et fluide

Starlight se démarque par son design simplifié et son orientation conviviale. L'application met un point d'honneur à rendre l'astronomie accessible, même aux utilisateurs les moins expérimentés. Avec une carte étoilée interactive, elle permet d'identifier rapidement les constellations et les principaux astres. Pas moins de 100 000 étoiles, 88 constellations et des fiches pédagogiques sur les planètes référencées, sont disponibles. Vous ne manquerez pas d'informations sur les astres et corps célestes.



STARLIGHT - EXPLORE THE STARS © ION6, LLC

Starlight met aussi l'accent sur l'apprentissage progressif. Les utilisateurs peuvent explorer des sections éducatives qui expliquent les bases de l'astronomie et les phénomènes célestes de [manière claire](#) et concise. Ils peuvent ensuite passer d'une section à une autre dès qu'ils le souhaitent. À télécharger sur les appareils Android et iOS.

Night Sky, l'innovation au cœur de l'astronomie

Réservé aux appareils [Apple](#) (iOS et [Mac OS](#)), Night Sky se distingue par ses fonctionnalités technologiques innovantes. L'application exploite la réalité augmentée et la géolocalisation pour offrir une expérience immersive et personnalisée, encore plus impressionnante avec l'Apple Vision Pro. Avec un simple mouvement de l'appareil, les utilisateurs peuvent explorer des représentations réalistes du ciel nocturne et obtenir des informations détaillées sur chaque étoile, planète ou satellite visible.



NIGHT SKY © ICANDI APPS

Night Sky est particulièrement appréciée pour ses options de découverte guidée, qui proposent des parcours thématiques à travers les constellations. Ces parcours combinent histoire, mythologie et science, permettant une immersion complète dans l'[univers](#) astronomique. En outre, son intégration avec des AirPods Pro ou Max (pour un voyage audio immersif) ou des [téléscopes](#) connectés en fait une application adaptée aux nouvelles générations.

Rheticus



Georg Joachim de Porris (en allemand : *von Lauchen*), surnommé **Rheticus** (parfois *Rhæticus*) c'est-à-dire « originaire de Rhétie »², est un astronome et mathématicien, né à Feldkirch (Voralberg, Autriche) le 16 février 1514, mort le 4 décembre 1574 à Kassa dans le royaume de Hongrie (aujourd'hui Košice en Slovaquie). Il est passé à la postérité pour avoir décidé Copernic à publier son grand œuvre, le *De revolutionibus orbium coelestium*, qui présente en détail sa théorie héliocentrique. Rheticus en a d'abord présenté lui-même les principes essentiels dans sa *Narratio Prima*, parue en 1540. Ce « premier rapport » reste considéré comme une excellente introduction aux idées de Copernic.

En mathématiques, il est également connu pour ses travaux sur les tables trigonométriques. Les meilleures de l'époque, publiées bien après sa mort par son élève Valentin Otto dans l'*Opus Palatinum de Triangulis* (1596), lui sont essentiellement dues.

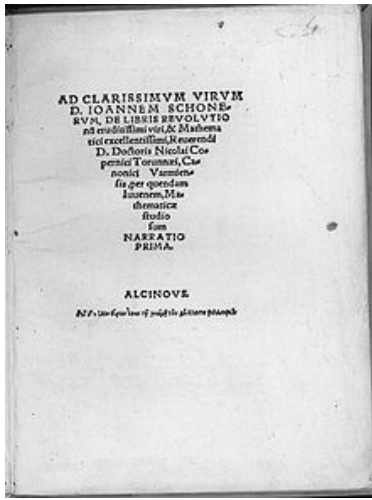
Biographie

Jeunesse et premières études

Rheticus, de son nom de baptême Georg Joachim Iserin, naît à Feldkirch dans une famille aisée du Tyrol autrichien. Son père, Georg Iserin, est le médecin de la ville ; sa mère, Thomasina de Porris, est de bonne famille italienne. En 1528, son père est condamné pour escroquerie et décapité³, et ses enfants ne peuvent plus porter son nom. Georg Joachim prend alors, à 14 ans, le nom de sa mère, *de Porris* (des poireaux). Plus tard, il adoptera parfois la traduction allemande *von Lauchen*⁴. D'abord éduqué par son père, Rheticus étudie ensuite dans sa ville natale. Pendant cette période il fait la rencontre du médecin et érudit protestant Achilles Gasser, de 9 ans son aîné (celui-ci reprendra en 1538 le poste de son père à Feldkirch), dont il devient le protégé et un ami proche⁵. Il poursuit ses études à Zurich, où il se lie avec Conrad Gessner, qui est son camarade de classe, et où il a l'occasion de rencontrer Paracelse⁴.

Recommandé par Gasser, il s'inscrit en 1532 à l'université de Wittenberg, alors centre du luthéranisme, où il obtient un diplôme de maîtrise en 1536. Étudiant brillant, il est remarqué par le grand théologien luthérien Philippe Melanchthon, également passionné d'astronomie, à qui Martin Luther a confié l'université. Celui-ci lui attribue, dès l'obtention de son diplôme, un poste d'enseignant de mathématiques pour les premières années⁶. La même année, Erasmus Reinhold, arrivé 2 ans avant Rheticus à Wittenberg et déjà enseignant, se voit confier la chaire d'astronomie⁶. En 1538, Melanchthon autorise Rheticus à laisser ses enseignements pour voyager afin de parfaire son éducation en astronomie. Rheticus se rend à Nuremberg auprès de l'astronome, mathématicien et cartographe Johann Schöner³. Il y fait également connaissance de l'imprimeur Johann Petreius, expert dans l'édition mathématique et astronomique, et qui est en

Il peut paraître curieux qu'un jeune universitaire protestant se rende aussi facilement en Prusse royale (polonaise et catholique) rendre visite à un chanoine auprès duquel il est resté finalement 2 ans, mais l'opposition entre catholiques et protestants n'était pas encore aussi vive qu'elle le sera après le concile de Trente⁸. De plus, le chanoine Copernic, ainsi que son ami, l'évêque Tiedemann Giese, étaient gens d'église et catholiques convaincus mais tolérants aux idées de la Réforme (et d'ailleurs minoritaires sur ce point parmi leurs confrères)⁹.



présente les travaux du « Docteur Nicolas Copernic de Thorn »¹⁸. Mais Rheticus a préféré rester un anonyme « jeune étudiant de mathématiques »¹⁹. La brochure est un succès. Par l'intermédiaire de Gasser, elle sera réimprimée à Bâle en 1541, cette fois-ci sous le nom de Rheticus^{20,21}.

Rheticus a obtenu, avec l'aide de Giese, que Copernic accepte de publier ces travaux. Il va passer près de 2 ans auprès de Copernic pour l'aider à préparer son manuscrit²². Rheticus doit reprendre ses cours à Wittenberg de mars à juillet 1540. De retour à Frauenburg il propose à Copernic de copier son manuscrit pour le faire publier à Nuremberg par Petreius²³, qui a été enthousiasmé par la *Narratio prima* et a proposé ses services à Rheticus²⁴. L'impression d'un travail aussi technique que celui de Copernic n'était pas simple, et il n'existait pas d'imprimeur



compétent à proximité de Frauenburg.

Le système de Copernic (extrait du *De revolutionibus*).

Rheticus retourne à Wittenberg à l'automne 1541, et il emporte avec lui le manuscrit du *De revolutionibus*. Il est élu doyen en 1541⁴, et y enseigne l'année 1541-1542. En 1542 il fait imprimer à Wittenberg une petite brochure, *De lateribus et angulis triangulorum* qui contient les extraits du livre de Copernic au sujet de la trigonométrie plane et sphérique, et à laquelle il ajoute une table de *demi-cordes* sous-tendues par un cercle (en termes modernes de sinus). La table est plus précise que celle du *De revolutionibus*, elle est donnée de minute en minute (10 minutes pour le *De revolutionibus*), et, en valeur entière ramenée à un rayon de 10^7 (10^5 pour le *De revolutionibus*). La table indique également l'angle complémentaire ce qui en fait la première table connue de cosinus (le nom n'apparaît pas)⁴. Bien que Rheticus ne l'attribue ni à Copernic, ni à lui-même, elle lui serait due selon certains historiens⁴, mais il semble que les données soient essentiellement reprises des tables de Regiomontanus²⁵. Les calculs de tables trigonométriques (avec d'autres contributions à venir) constitueront l'originalité de la contribution de Rheticus à l'histoire des mathématiques⁴.

En mai 1542, il apporte le manuscrit de Copernic à Nuremberg pour le confier à Petreius, et supervise la longue et complexe impression. Il faut graver les bois pour les nombreux diagrammes du livre, et Rheticus a le temps de faire un aller-retour à Feldkirch. Il reçoit une offre de poste à Leipzig, plus intéressante en particulier financièrement que sa position à Wittenberg, mais qui l'oblige à quitter Nuremberg à l'automne 1542, avant la fin de l'impression du traité de Copernic. Il confie alors la relecture des épreuves à Andreas Osiander, un théologien protestant ami de Petreius, et intéressé par l'astronomie²³.

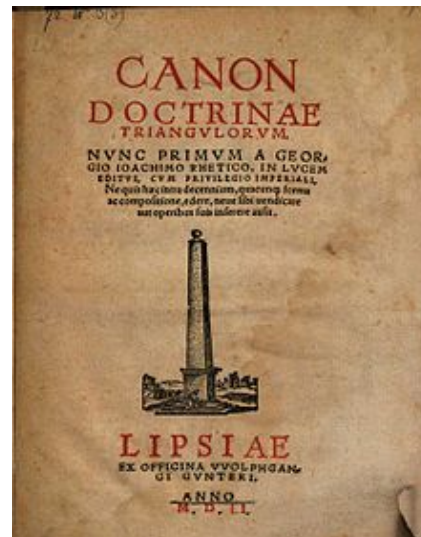
L'évènement a plus de conséquences que prévu. Osiander choisit de renommer le *De revolutionibus* en *De revolutionibus orbium cœlestium*²³, et surtout il y ajoute anonymement une préface de son cru qui fait du système héliocentrique de Copernic une simple hypothèse mathématique, ignorant l'avis à ce sujet de Copernic qu'il a sollicité par lettre en 1541²⁶. Rheticus en

est informé trop tard pour pouvoir s'y opposer. L'impression est terminée fin mars 1543. Copernic, à qui les premières épreuves ont été envoyées et qui a rédigé une première feuille d'errata, souffre d'une attaque qui le laisse à moitié paralysé en décembre 1542 et meurt le 24 mai 1543. La défense de son œuvre passe à ses amis Giese et Rheticus. Giese s'oppose en vain à la préface d'Osiander, allant jusqu'à demander au conseil municipal de Nuremberg d'intervenir. Il sollicite Rheticus pour que celui-ci y substitue une biographie de Copernic et une justification de ce que le système héliocentrique ne contredit pas la Bible²⁶. Rien ne sera fait. La préface, en dehors d'un cercle d'initiés, sera longtemps attribuée à Copernic lui-même.

Les historiens attribuent à Rheticus une biographie de Copernic aujourd'hui perdue²⁷. Il a également écrit une défense du système héliocentrique contre une lecture trop littérale de la Bible, probablement à cette époque, mais qui n'a été imprimée et publiée (anonymement) que plus d'un siècle plus tard, en 1651^{26,28}.

A la mort de son maître, Rheticus hérite du manuscrit original du *De Revolutionibus*, non celui qui a servi à l'impression, mais celui sur lequel Copernic travaillait, et qu'il avait continué de corriger après le départ de son disciple. Le manuscrit existe toujours, après quelques détours il se trouve aujourd'hui à la bibliothèque Jagellonne de l'université de Cracovie (où Copernic avait commencé ses études)²⁹.

Professeur à Leipzig La page de titre du *Canon doctrinae triangulorum* (Canon de la science des triangles) de 1551, montre un obélisque, symbole de l'ancienneté de l'observation astro-



mique, et « marque de fabrique » de Rheticus³⁰.

La suite des événements fait apparaître une certaine instabilité dans le caractère de Rheticus³¹. Mais il assure tout d'abord ses enseignements à Leipzig pendant 3 ans. Il obtient alors l'autorisation de s'absenter, et part pour l'Italie où il rencontre Jérôme Cardan. Pendant son séjour à Lindau, début 1547, il souffre de désordres mentaux tels qu'une rumeur court qui le dit mort. Il enseigne cependant à Constance le dernier semestre de 1547. Il se rend ensuite à Zurich où il étudie la médecine auprès de Conrad Gessner (son ancien condisciple). Il retourne à Leipzig, où il a été élu doyen, fin 1548 et reprend ses cours. Il y publie en 1550 ses *Ephemerides novae* (éphémérides astronomiques), fondées sur la cosmologie de Copernic³², puis en 1551 les premières tables trigonométriques qui lui soient réellement dues, le *Canon doctrinae triangulorum* (Canon de la science des triangles). Celles-ci sont les premières tables à présenter les 6 fonctions trigonométriques, sinus, cosinus, tangente et leurs inverses, cosécante, sécante et cotangente (cependant pas sous ces noms que Rheticus n'apprécie pas)³⁴. Elles sont données de 10' en 10', en valeur entière ramenée à un rayon de 10⁷. Même si elles ne sont pas adoptées par tous les astronomes, elles influencent directement Francesco Maurolyco en 1558, et François Viète pour les tables moins précises (10⁻⁵), mais de minute en minute de son *Canon mathematicus* publié en 1579. Elles inspireront également bien sûr les futurs travaux de Rheticus³³. Peu d'exemplaires du *Canon doctrinae triangulorum* nous sont parvenus, il a été redécouvert et étudié dans une publication de 1845 par Auguste de Morgan³⁴.

Fortement endetté, Rheticus est compromis en 1551 (l'année de publication du *Canon doctrinæ triangulorum*) dans une affaire homosexuelle avec un jeune étudiant³⁵, ce qui est alors passible du bûcher, selon le code criminel de Charles Quint édicté en 1532³⁶. Poursuivi pour sodomie —le père l'accuse d'avoir enivré puis abusé de force de son fils³⁷—, il doit quitter en urgence Leipzig. Rheticus se fait représenter par un avocat au procès, qui se conclut en 1552 par une condamnation à 101 ans d'exil. Cependant, la cour choisit de ne pas rendre publique la sentence, ce qui évite à Rheticus d'autres poursuites. Ses biens sont également confisqués à la suite des dettes qu'il avait laissées³⁸. Il perd à partir de ce moment le soutien de Melancthon³⁹, mais reste en bons termes avec Joachim Camerarius et son fils, comme l'attestent leurs correspondances³⁶.

Son poste de professeur à Leipzig sera le dernier : malgré des sollicitations ultérieures, Rheticus abandonne définitivement sa carrière d'universitaire⁴.



Page de titre de l'*Opus Palatinum de Triangulis* (1596).

Médecin à Cracovie

Rheticus se rend à Prague (le royaume de Bohême est à l'époque sous dépendance des Habsbourg, mais abrite une importante communauté protestante) et y reprend des études médicales. Après avoir décliné une invitation à enseigner à Vienne, il s'installe en 1554 à Cracovie, où il va pratiquer la médecine pendant 20 ans⁴ en disciple de Paracelse tout aussi révolutionnaire dans son domaine que Copernic en astronomie⁴⁰. Dans ce domaine Rheticus semble cependant s'être contenté d'être praticien⁴¹.

Il n'abandonne pas pour autant l'astronomie, l'astrologie, et les mathématiques, où sa grande passion reste l'établissement de tables trigonométriques. En 1568, il écrit à Pierre de La Ramée au sujet d'un projet d'observatoire astronomique « fondé sur le principe des obélisques égyptiens ».

En 1574, l'année de sa mort, il est à Košice (alors dans le royaume de Hongrie, sous domination autrichienne) où il a été invité par un riche mécène. Un jeune mathématicien impressionné par son *Canon doctrinæ triangulorum*, Valentin Othon (ou Otto), vient l'y retrouver. Rheticus a maintenant presque l'âge de son maître Copernic quand lui-même était parti à sa recherche. Otto va l'aider à son grand œuvre, la publication de nouvelles tables trigonométriques bien plus précises que celles existantes, l'*Opus Palatinum de triangulis*. Mais Rheticus meurt le 4 décembre 1574, avant de voir son travail achevé. Son élève hérite de son manuscrit et du manuscrit original de Copernic. Il ne pourra publier les tables qu'en 1596. Quant au précieux manuscrit du *De Revolutionibus*, il passera dans d'autres mains à la mort d'Otto⁴².

L'*Opus Palatinum de triangulis* sera corrigé par Pitiscus, et ce dernier utilisera cet ouvrage ain-

si que les manuscrits de Rheticus pour son *Thesaurus mathematicus*. Les tables de Rheticus et Pitiscus seront largement diffusées, mais verront leur intérêt décliner avec la découverte des logarithmes, qui bouleverse les méthodes de calculs⁴³.

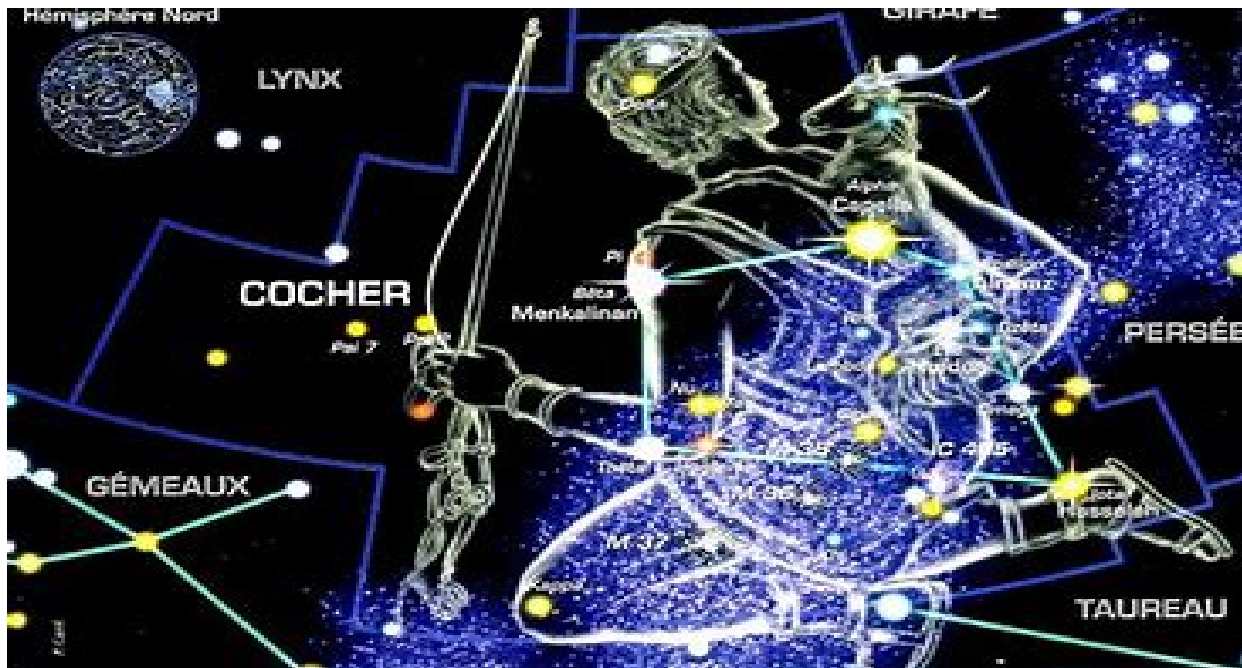
Œuvres

(la) *Narratio prima*, Dantzig, Franz Rhode, 1540 (lire en ligne [archive]), voir aussi [archive], également disponible sur Wikisource, édition critique et traduction en français (Rheticus 1982).
(de) *Tabula chorographica auff Preussen und etliche umbliegende lender*, Wittenberg, 1541.
(la) *De lateribus et angulis triangulorum*, Wittenberg, Hans Lufft, 1542 (avec Nicolas Copernic).
(la) *Ephemerides novae*, Leipzig, Wolfgang Gunter, 1550 (lire en ligne [archive]).
(la) *Canon doctrinae triangulorum*, Leipzig, Wolfgang Gunter, 1551 (lire en ligne [archive]). (la) *Opus palatinum de triangulis*, Neostadii in Palatinatu, Matthaeus Harnisius, 1596 (lire en ligne [archive]) (avec Valentinus Otho).
(la) *Cujusdam anonymi epistola, de terrae motu*, Utrecht, 1651, ouvrage anonyme identifié et attribué à Rheticus en 1973 par Reijer Hooykaas (en)⁴⁴ ; cet ouvrage, que Rheticus aurait écrit vers 1540, défend le système héliocentrique contre une lecture trop littérale de la bible, traduction (Hooykaas 1984).

Hommage

(15949) Rhaeticus, astéroïde nommé en son honneur.

Le Ciel de Décembre Le Cocher (Auriga, en latin)





Sa Situation céleste

Cette constellation se trouve plein sud en milieu de nuit, juste au-dessus d'Orion. Le Cocher est souvent représenté un fouet à la main, portant une chèvre sur son épaule. C'est grâce à Capella (chevrette en latin,) une étoile de magnitude 0, que l'on repère le Cocher.

Capella cache un système stellaire multiple dont les composantes principales sont 2 étoiles géantes 10 fois plus larges et 3 fois plus massives que le Soleil, accompagnées de 2 naines rouges.

La constellation du Cocher a la forme d'un pentagone dont la pointe est une étoile commune avec celle du Taureau, (Bêta tauris), Alneth.

Sous Capella on repère un triangle pointu formé des étoiles (epsilon aurige), Almaaz. Êta et Dzêta dont les éclats se situent entre les magnitudes 3 et 4. Un ensemble symbolisé par 2 chevreaux sur les gravures classiques.



Cercles pointillés rouges : **amas ouverts** / plusieurs cercles : **nébuleuse planétaire** / en jaune : **galaxie** / cercle rouge plein : petite nébuleuse entourant l'étoile AE.

Rappels :- un **amas ouvert ou galactique** est un groupement de 100 à 10 000 étoiles de même âge et liées temporairement par la gravitation. Ils ont une vie courte en tant qu'essaim d'étoiles car leurs membres finissent par s'échapper.

- un **amas globulaire** est bcp plus grand que l'amas ouvert et ses composants. Il peut contenir des millions d'étoiles qui sont étroitement liés par la gravitation.

-une **nébuleuse** est un nuage géant de gaz et de poussières interstellaires qui apparaît lorsqu'une étoile naît ou meurt : nébuleuse planétaire (étoiles en fin de vie), en émission (rémanents de supernovas)...

Ce que l'on peut découvrir avec nos instruments :

Aux jumelles : le cocher est traversé par la voie lactée et offre donc de beaux paysages célestes grâce à des amas stellaires : M36, M37 et M38 très brillants. L'étoile RT est une variable de type Céphéide dont l'éclat passe de la magnitude 5 à 5,8 sur une période de 3,7 jours.

A la lunette : M37 (NGC2099) est un des plus beaux amas ouverts observables à notre latitude. On peut même le voir à l'œil nu par temps et atmosphère clairs. NGC 2281 est un autre petit amas ouvert de magnitude 5,4 situé à l'ouest de la constellation.

Au 200mm : M 38 (NGC1932) comporte une centaine d'étoiles jusqu'à la magn 9,7. La nébuleuse planétaire IC 2149 se trouve au nord de Bêta du Cocher. Sigma 644 est une étoile double dont les 2 composantes sont écartées d'1''6. L'une d'elle de couleur orangée a une magnitude de 6,7. L'autre est bleue et brille d'une magnitude 7.

Pour les plus spécialisés : on dénombre dans la constellation une multitude d'amas ouverts Ils possèdent en moyenne une cinquantaine d'étoiles et leur magnitude est de l'ordre de 10. IC 405 est une nébuleuse discrète entourant l'étoile AE et située à quelque 1600 al de la Terre. Une autre galaxie et notamment spirale est présente mais avec une magnitude de 14, ce qui le rend difficile à observer.

Dans la mythologie

le Cocher serait Erichthonios, légendaire roi d'Athènes et inventeur du quadriges, char tiré par un attelage de 4 chevaux :

L'Antiquité a placé dans cette constellation le fameux [Erichthonios](#), fils d'[Héphaïstos](#) et de [Gaïa](#), suivant les uns ([Pausanias](#), Eratosthène), ou d'[Athéna](#), selon d'autres ([Germanicus](#)). [Zeus](#) admira le génie inventif d'Erichthonios, qui le premier imagina, sur la terre le Char à quatre chevaux, comme [Apollon](#) l'avait inventé aux Cieux. Il imagina en effet un attelage de quatre chevaux blancs à l'imitation de ceux du Soleil. Pour perpétuer le souvenir et l'admiration de sa découverte, Zeus le plaça aux cieux (Germanicus, [Hyginus](#), Eratosthène, [Isidore de Séville](#)). Il institua aussi le premier les [sacrifices](#) d'Athéna, les [fêtes Panathénées](#), et construisit le temple et la citadelle d'Athènes.



Séléné

Séléné (Gr. Σελήνη; Lat. Selene) était la fille des Titans [Théia et Hypérion](#), et la sœur d'Eos et d'Hélios. Selon d'autres auteurs elle serait la fille d'Hélios et d'Euryphaessa (Hymne homérique à Hélios). Elle était la déesse de la lune que les romains appelèrent Luna.

Elle était figurée sous les traits d'une belle jeune femme d'une blancheur étincelante, elle parcourait le ciel sur un char d'argent traîné par deux chevaux.

Légendes

Vision d'Endymion par Sir Edward Poynter

Comme sa sœur [Eos](#), elle connut de nombreux amants. Elle passait pour avoir été aimée de Pan qui se transforma en bélier aux poils blancs pour la séduire. Il lui fit cadeau d'un troupeau de bœufs blancs

Zeus à qui elle donna des enfants : Pandia et d'Ersé (la Rosée) et Néméa, lui fit cadeau d'une magnifique toison blanche. (Allusion à la gelée blanche)

Mais son amour le plus célèbre fut pour le beau berger nommée [Endymion](#) avec qui elle eut cinquante filles. Parfois on donne aussi Naxos comme son fils.

Ne pouvant se résigner à voir disparaître son amant elle obtint une sorte d'immortalité pour lui et Endymion fut endormi pour l'éternité. (à moins que la demande émane de lui-même afin de préserver sa beauté).

Séléné venait le voir dans la grotte du Mont Latmos en Carie lors de son passage dans le ciel et le caressait de ses rayons d'argent.

A chaque éclipse de lune, on dit que Séléné allait être mangée par un dragon. On effectuait certains rites pour éviter ce désastre. Plus tard elle fut aussi identifiée à Hécate et à Artémis avec qui elle forme une triade : Séléné représente la pleine lune, Artémis le croissant de lune, et Hécate la nouvelle lune.

Arts.



Karl BRIOULLOV

Nicolas POUSSIN



Filiation

Théia

[Hypérion](#)

SELENE

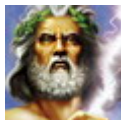
Epouse* / amante

Enfants



-

[Pan](#)



Hersé

Pandia

[Zeus](#)

?

Lion de Némée

[Endymion](#)

50 filles

Bibliographie

- Dictionnaires et encyclopédies Britannica, Larousse et Universalis.
- Encyclopédie de la mythologie d'Arthur COTTERELL; (plusieurs éditions) Oxford 2000
- Encyclopedia of Ancient Deities de de Charles RUSSELL COULTER et Patricia Turner
- Dictionnaire des mythologies en 2 volumes d'Yves BONNEFOY, Flammarion, Paris, 1999.
- L'encyclopédie de la mythologie : Dieux, héros et croyances de Neil PHILIP, Editions Rouge et Or, 2010
- Mythes et légendes; Editions de Lodi, Collectif 2006.
- Mythes et mythologie de Félix GUIRAND et Joël SCHMIDT, Larousse, 1996.
- Dictionnaire des symboles de Jean CHEVALIER et Alain GHEERBRANT, 1997
- Dictionnaire de la fable de François NOEL
- Dictionnaire critique de mythologie de Jean-Loïc LE QUELLEC et Bernard SERGENT

Sources antiques

- [Apollodore](#), Bibliothèque: I, 2, 2
- [Hésiode](#), Théogonie: 375
- [Pausanias](#), Périégèse: V, 1, 4
- [Virgile](#), Géorgiques: III, 391

LE SAVIEZ-VOUS ?

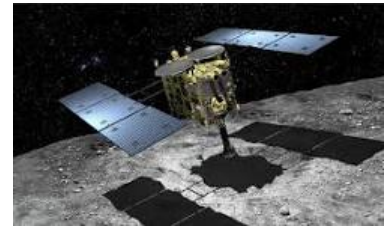
1) Le 3 décembre

Le 3 décembre 1904, l'astronome américain Charles Dillon Perrine découvre Himalia, le sixième satellite de Jupiter et le plus gros des satellites irréguliers de la planète gazeuse. Ce petit astre d'environ 120 km circule à 11 millions de kilomètres de Jupiter et a peut-être été capturé par celle-ci. La découverte a été réalisée à l'observatoire Lick en Californie



2) Le 3 décembre

Le 3 décembre 2004, la sonde japonaise Hayabusa 2 s'élance de la base de Tanegashima. En juin 2018, elle rejoint l'astéroïde Ryugu, situé sur une orbite comprise entre 0,96 et 1,42 unité astronomique. En 2019, elle plonge vers Ryugu pour collecter des échantillons de l'astéroïde, qu'elle rapporte sur Terre le 6 décembre 2020.



3) Le 9 décembre

Le 9 décembre 1874 a lieu le premier transit de Vénus du XIX^{ème} siècle. L'observation du passage de la planète devant le disque solaire permet de mesurer la distance Terre-Soleil (ou unité astronomique), tout comme le transit suivant, huit ans plus tard. La valeur obtenue est 149,9 millions de kilomètres soit un écart de seulement 0,2% avec la distance moyenne actuellement admise ; 149,6 millions de kilomètres.

3) Le 26 décembre

Le 26 décembre 1624 meurt l'astronome allemand Simon Marius. C'est lui qui a nommé Io, Europe, Ganymède et Callisto, les 4 grands satellites de Jupiter, qu'il a découvert quelques jours après Galilée en janvier 1610



Ciel et Espace

ENIGME

Une constellation qui au lieu du nom actuel s'appelait
L'Agenouillé : laquelle ?

Envoyez vos solutions à :

andrebourdet@gmail.com

Solution de l'énigme précédente

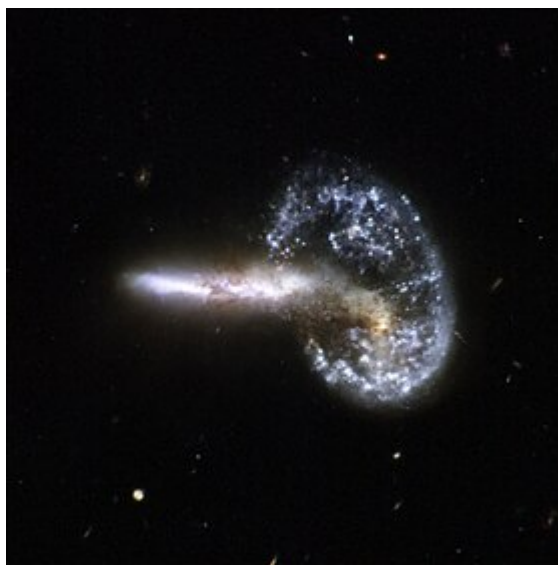
Etoiles & Constellations

Mon premier peut réparer un squelette
Mon second prépare du cuir
Mon troisième peut coucher plusieurs personnes
Mon tout est un Centaure qui attaque un dangereux Scorpion

Sa parce que « sa » sert d'os
Gi parce que gi tanne
Terre parce que terre a des lits (Terre Adélie)
Sagittaire

•

Arp 148 ou l'Objet de Mayall,



Arp 148, également appelée l'**Objet de Mayall**, est un objet résultant d'une collision entre deux galaxies particulières, découvert le 13 mars 1940 par Nicholas Mayall à l'observatoire Lick avec le télescope Crossley³, située dans la constellation de la Grande Ourse.

Distance et morphologie

Distance

Près d'une quarantaine de mesures non basées sur le décalage vers le rouge (*redshift*) donnent une distance de $156,33 \pm 10,95$ Mpc (510 millions d'al)⁴, ce qui est à l'intérieur des distances calculées en employant la valeur du décalage vers le rouge^{Note 1}.

La vitesse radiale de $10\,599 \pm 32$ km/s de cette structure est élevée et on peut employer la loi de Hubble-Lemaître pour calculer sa distance. Le résultat donne $156,33 \pm 10,95$ Mpc (510 millions d'al)^{Note 1}. Basée sur un décalage vers le rouge de $z = 0.03452 \pm 0.00009$, le couple de galaxies se situe à 152 ± 10 Mpc (496 millions d'al)⁵.

Morphologie

Il s'agit d'un objet résultant d'une collision de deux galaxies, probablement deux galaxies irrégulières, donnant naissance à une galaxie à anneau avec un fragment de galaxie irrégulier qui en émerge. Son type morphologique dans la séquence de Hubble est "Ring", sa distance de 152 ± 10 Mpc (496 millions d'al) corrélé avec sa taille angulaire suggère que la structure totale mesure $29\,070 \pm 10$ pc (94 800 al) de diamètre, soit un objet 0,948 fois la taille de la Voie lactée⁵.

Histoire observationnelle

L'objet de Mayall a d'abord été pris pour une nébuleuse, puis nommé l'objet de Mayall en raison de ses particularités. Pour déterminer sa nature, Robert T. Smith réalisera plusieurs spec-

troscopies le 1 et 2 mai 1940 à l'aide du Nebular Spectrograph, les raies spectrales de l'objet montrent qu'il est extragalactique, car à cette époque les galaxies n'étaient pas encore bien connues, souvent considérées comme des nébuleuses géantes. Les raies spectrales de cet objet ont d'ailleurs été reliées par Robert T. Smith à celles observées dans la galaxie M82 et NGC 278³.

Propriétés

Objet de Mayall

L'objet de Mayall est connu pour émettre de fortes raies d'émissions d'atomes ionisés, telles que Ha, O I, O II, He II et Ne II, montrant la présence d'hydrogène, oxygène, hélium et du néon dans le centre de la galaxie. Les mesures du décalage vers le rouge dans les différentes parties de l'objet montrent que ; dans le centre galactique, à $4\,200 \pm 10$ pc ($13\,700$ al) d'un trou noir supermassif, les étoiles et autres structures vont à une vitesse globale de ~ 200 km/s ; dans l'anneau galactique, les étoiles et autres vont à une vitesse ~ 60 km/s⁶.

Galaxie anneau

Une autre propriété très particulière est le fait que l'anneau irrégulier, aussi nommée SDSS J110352.73+405056.4, ne possède pas de noyau galactique, pas de structure spirale et de fortes traces d'atomes ionisés. Le fait que l'anneau émette bien trop de raies d'azote et bien trop peu de raies d'hydrogène alpha semble montrer la présence d'une surabondance d'azote par rapport à l'abondance d'hydrogène⁶.

Galaxie lenticulaire

La galaxie en forme de cigare (à ne pas confondre avec la galaxie du Cigare), aussi nommée SDSS J110354.31+405100.1, au centre de l'objet de Mayall était une galaxie lenticulaire de type morphologique S0, mais son spectre tend à dire le contraire. Le spectre peut être troublé a cause d'une interaction entre la galaxie lenticulaire et son milieu interstellaire. Cette galaxie semble être aussi en surabondance d'azote par rapport à l'abondance d'hydrogène⁶.

Télescope spatial Hubble

L'objet de Mayall a été imagé par le télescope spatial Hubble pour une surveillance des galaxies en collision. L'image a été prise avec la caméra Wide Field and Planetary Camera 2. Elle a ensuite été révélée en 2008 avec 59 autres images d'objets similaires, pour le 18^e anniversaire du télescope spatial⁷.

Galerie

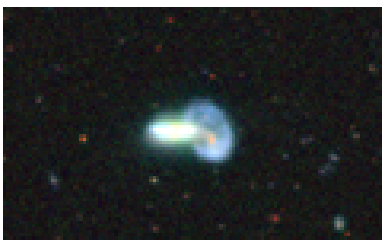
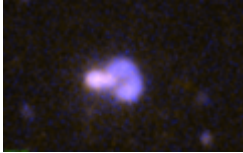
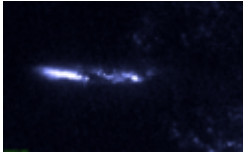


Image composite regroupant celle effectuée avec le télescope spatial Hubble dans le spectre optique et celle effectuée dans l'infrarouge moyen par le télescope spatial Spitzer.

-
-
- Image du [téléscope](#) de l'[observatoire de Tokyo](#).
- 
-
- Image composite de deux images du [téléscope spatial GALEX](#), dans le [proche ultraviolet](#) et l'[ultraviolet moyen](#).
- 
-
- Image d'un [téléscope](#) de l'[observatoire d'Apache Point](#) dédié au [Sloan Digital Sky Survey](#).
- 
-
- Arp 148 vue en [proche ultraviolet](#) par le [téléscope spatial Hubble](#) dans la [bande U](#).
-
-

Notes et références

Notes

- ^{1er}
- ^{2e} On obtient la distance qui nous sépare d'une galaxie à l'aide de la [loi de Hubble-Lemaître](#) : $v = H_0 d$, où H_0 est la [constante de Hubble](#) (70 ± 5 (km/s)/Mpc). L'[incertitude relative](#) $\Delta d/d$ sur la distance est égale à la somme des incertitudes relatives de la vitesse et de H_0

Références

- ^{1er}
- (en) [HubbleSite – 24 avril 2008](#) ^{[[archive](#)]} « *Cosmic Collisions Galore!* »
- (en) [NASA/IPAC EXTRAGALACTIC DATABASE](#) ^{[[archive](#)]} « *ARP 148* ».
- « [194IPASP...53..187S Page 188](#) ^{[[archive](#)]} », sur articles.adsabs.harvard.edu (consulté le 27 juillet 2022)
- « [Your NED Search Results](#) ^{[[archive](#)]} », sur ned.ipac.caltech.edu (consulté le 21 août 2020)
- « [By Name | NASA/IPAC Extragalactic Database](#) ^{[[archive](#)]} », sur ned.ipac.caltech.edu (consulté le 27 juillet 2022)
- « [1964ApJ...140.1617B Page 1619](#) ^{[[archive](#)]} », sur articles.adsabs.harvard.edu (consulté le 27 juillet 2022)
- (en) [Observatoire européen austral](#), « [Arp 148](#) ^{[[archive](#)]} », sur www.spacetelescope.org (consulté le 27 juillet 2022)

LIRE-VOIR-SORTIR



Un ouvrage à garder à tout prix sous peine d'errer dans l'espace pour l'éternité ! Des volcans cracheurs d'azote liquide, des océans souterrains dix fois plus profonds que le Pacifique, des icebergs d'ammoniaque dérivant sur une mer de méthane liquide ou encore des ouragans vertigineux qui pourraient engloutir la Terre : ces paysages fantastiques ne sont pas nés sous la plume d'un auteur de science-fiction, ils existent réellement dans notre Galaxie. Ce guide touristique interstellaire vous propose d'explorer une trentaine de ces mondes défiant notre raison, une odyssée inédite vous transportant à près de 1 500 années-lumière au large de notre Terre. Répartis en quatre catégories, des plus fréquentables aux plus infernaux en passant par les incontournables et les plus improbables, ces objets célestes sont aussi fascinants qu'étranges. Certains sont éclairés par deux soleils, d'autres sont littéralement collés à leurs étoiles. D'autres encore interdisent toute implantation d'un centre de vacances ; à l'exemple d'Osiris, secouée par des vents de plus de 10 000 km/h ou encore d'Isis, une fausse planète bleue agitée en permanence par de violentes averses de verre fondu. À l'opposé, des mondes

aussi hospitaliers que le nôtre pourraient camper à une quarantaine d'années-lumière de notre Terre... Embarquez à bord du vaisseau Micromégas, pour un périple interstellaire de près de 1 000 ans ! Un voyage inoubliable aux limites de notre imagination...

La caméra FRIPON



Le club est ouvert à tous (adultes et enfants).



http://www.fripon.org/IMG/jpg/stations/RT_FRBR04.jpg

Château d'eau

De Kersauz

Rue Guillemette le Barbier
56730 Saint Gildas de Rhuys

Renseignements :

Téléphone-répondeur : 09 53 52 85
63/0744762049

Messagerie :

clubastrorhuys@gmail.com