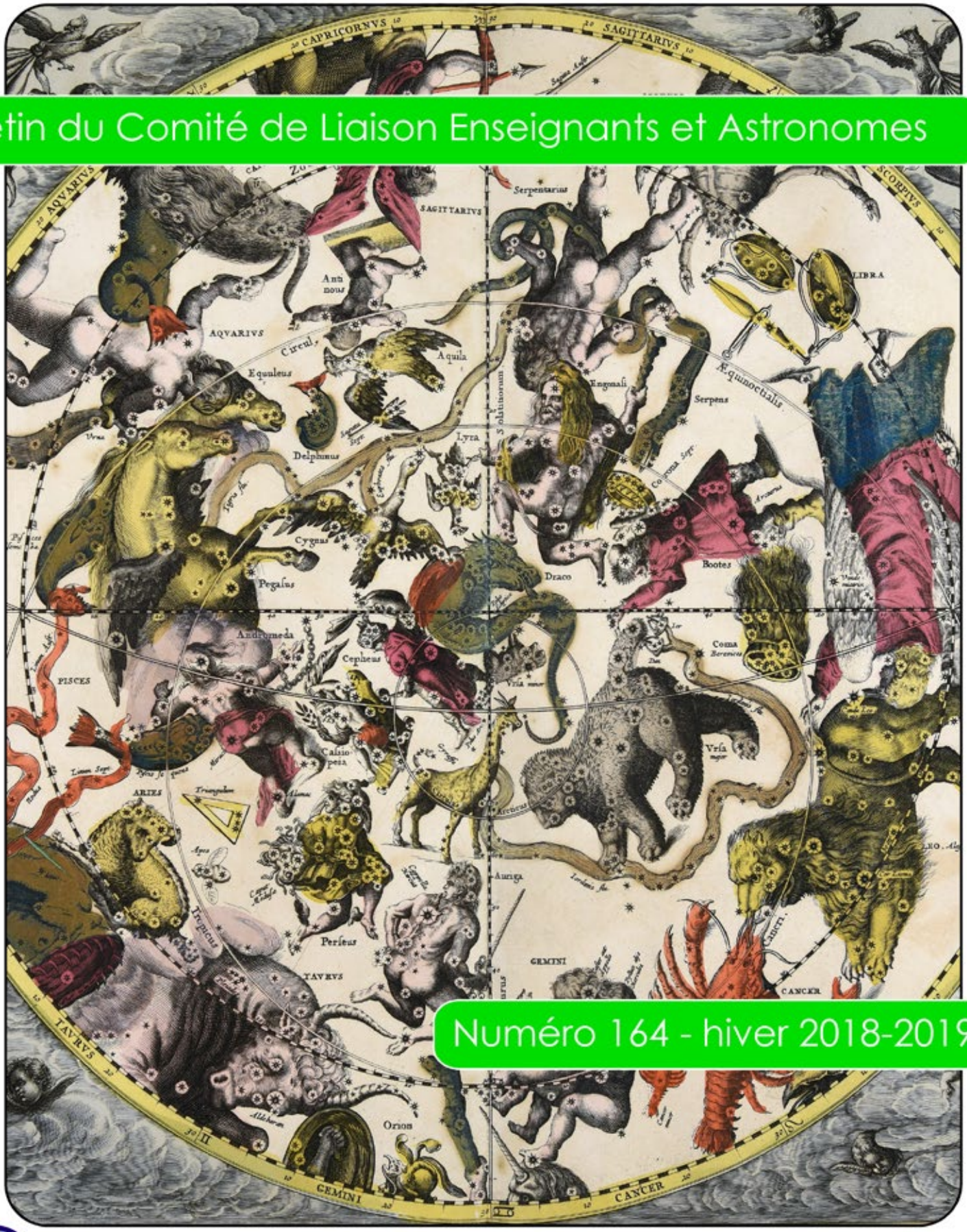
LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 164 - Décembre 2018 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 164 - hiver 2018-2019

ISSN 0758-234X

Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.
Le **CLEA** organise des stages nationaux (Écoles d'Été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.
L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement…), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.
Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

Présidents d'honneur :
Jean-Claude Pecker
Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel

Bureau du CLEA pour 2018
Présidente : Cécile Ferrari
Trésorière : Sylvie Thiault
Trésorière adjointe : Chantal Lecoutre
Secrétaire : Danièle Imbault
Secrétaire adjoint : Jean-Luc Fouquet

Responsables des groupes
Vie associative : Jean-Michel Vienney
Cahiers Clairaut : Christian Larcher
Productions Pédagogiques : Pierre Causeret
Communication : Charles-Henri Eyraud
École d'Été d'Astronomie : Danièle Imbault
Responsables du site :
Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud

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

Thomas Appéré, Francis Berthomieu, Michel Bobin, Danielle Briot, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Suzy Collin-Zanh, Hélène Courtois, Nathalie Cugnet, Véronique Hauguel, François Hurter, Roland Laffite, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Daniel Pomarède, Jean-Louis Rault, Jean Ripert, Josée Sert, Sylvie Thiault, Roland Trotignon.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 164 afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Carte de Cellarius de l'hémisphère céleste nord (vers 1660). Les constellations sont représentées comme sur un globe céleste, vues de l'extérieur de la sphère céleste donc inversées. La Grande Ourse par exemple a la tête dirigée du côté gauche, les Gémeaux sont à droite du Taureau… On reconnaît nos constellations actuelles à quelques petites différences près. Par exemple, Antinoüs, entre l'Aigle, le Sagittaire et le Capricorne, est une constellation maintenant disparue.

La carte est centrée sur le pôle nord de l'écliptique, le pôle nord céleste étant placé en dessous. On peut remarquer que ce pôle Nord céleste est situé à droite de l'étoile Polaire (alpha de la Petite Ourse), à plus de 2° comme c'était le cas au XVIIe siècle. L'écliptique est représenté sous la forme d'un cercle alternativement noir et blanc. (Image Haemisphaerium stellatum boreale antiquum, wikipedia commons, bibliothèque de Trente).

Les Cahiers Clairaut

Hiver 2018

Éditorial

Le terme Laniakea vous est-il familier ? C'est un terme hawaïen qui signifie *« horizon céleste immense »*. Pour les astrophysiciens ce terme désigne la plus grande carte dynamique jamais réalisée de notre Univers. Dans cette cartographie, les vitesses radiales d'un très grand nombre de galaxies forment des lignes de courant qui convergent vers le Grand attracteur. Chaque galaxie est analogue à un bateau emporté pas des courants. Cette carte présente aussi l'intérêt de prendre en compte, bien qu'indirectement, la présence de la matière noire. Elle s'étend sur 500 millions d'al à comparer aux 100 000 al de notre Galaxie…

Le thème de ce numéro est consacré *« aux représentations du ciel »*.

Vous y trouverez, en remontant le cours du temps : au XVIIe, les supports scientifiques de l'époque, « les atlas du ciel », documents scientifiques tout autant qu'objets d'art ; au Moyen Âge les fresques pédagogiques de la basilique Saint-Sernin à Toulouse qui datent du XIIIe siècle ; plus loin encore l'apport précieux du monde arabe avec *le livre des constellations* de **al Sufi** (964).

Ces représentations sont complétées par celles que proposent actuellement les mathématiciens ; ils parviennent à faire de subtils compromis pour représenter tous les points d'une sphère sur une surface plane en privilégiant spécifiquement tel ou tel paramètre.

En dehors de ce thème, nous vous invitons à découvrir une « histoire du temps » qui s'appuie sur des gravures préhistoriques de la vallée des Merveilles dans le Mercantour et dans d'autres lieux de la région.

En classe, avec vos élèves, vous pourrez exploiter les résultats de Gaïa sur l'amas ouvert des Pléiades, construire une carte quadratique des sept principales étoiles de cet amas et même étudier le mouvement propre ces étoiles sur une durée de 100 000 ans…

En lien avec l'actualité astronomique récente, nous vous proposons un article qui explique pourquoi l'UAI a décidé de modifier l'appellation de la loi célèbre concernant l'expansion de l'Univers.

Enfin, tout récemment, suite à l'atterrissage réussi de la sonde InSight à la surface de Mars (26 novembre 2018) que peut-on attendre ? Pourra-t-on expliquer pourquoi la planète Mars, sur laquelle coulait autrefois de l'eau liquide, a connu une évolution à long terme aussi si différente de la nôtre ?

Christian Larcher pour l'équipe

Sommaire

Avec nos élèves
Les cadrans solaires : une histoire du temps
Nathalie Cugnet p 2

Thème : les représentations du ciel p 7

Notions de base
Cartes du ciel, cartes de la Terre
Michel Bobin, Pierre Causeret p 8

Histoire
Abd al-Rahmān al-Sūfī et son *Livre des constellations* (964)
Roland Laffitte p 12

Histoire
Une fresque pédagogique au XIIIe siècle à Toulouse ?
Josée Sert p 15

Les représentations du ciel dans les productions du CLEA p 17
Mots croisés représentations du ciel p 17

Histoire
Les grands atlas célestes
Roland Trotignon p 18

Astrophysique
Laniakea, l'Univers en trois dimensions
Daniel Pomarède et Hélène Courtois p 22

Observation
Ciel de l'hiver 2018 - 2019
Pierre Causeret p 28

Histoire
De la loi de Hubble à la loi de Hubble-Lemaître
Danielle Briot p 29

Avec nos élèves
Les Pléiades vues par Gaia
Sylvie Thiault p 33

Astronautique
InSight
Thomas Appéré p 36

Recension
L'ordre du temps, Carlo Rovelli
Christian Larcher p 37

Vie associative
L'éclipse totale de Lune du 21 janvier 2019 p 39
Le hors-série n° 40 LE SOLEIL est arrivé p 40
Solution au problème de la date de Pâques p 40
Solutions des mots croisés p 40

Les cadrans solaires une histoire du temps

Nathalie Cugnet, professeur agrégé, collège Jean-Baptiste Rusca, Tende

La notion de temps semble évidente et maîtrisée au collège par tous les élèves. Mais est-ce vraiment le cas, même pour les adultes ? Comme l'a dit Saint-Augustin (354-430) : « Qu'est-ce donc que le temps ? Si personne ne me le demande, je le sais ; mais si on me le demande et que je veuille l'expliquer, je ne le sais plus. ». La nature même du temps s'est construite peu à peu au fil de l'histoire. C'est ce que je vais tenter de vous montrer dans cet article en m'appuyant sur des exemples de deux sites exceptionnels situés près de l'endroit où j'habite et j'enseigne : la vallée des Merveilles à Tende et le Monastère de Saorge, tous deux dans les Alpes-Maritimes. La science des cadrans ou gnomonique suscite un grand intérêt tant auprès des amateurs que des scientifiques. En France, la commission des cadrans solaires créée par la SAF (Société astronomique de France) œuvre depuis des années pour la recherche et la valorisation de ces cadrans. En 2011, sur les 31 955 cadrans inventoriés, les Alpes-Maritimes arrivent en seconde position avec 930 cadrans, juste derrière la Charente-Maritime qui en compte quand même 1 859. L'inventaire 2017 fait état de 35 650 cadrans en France.

La préhistoire du temps

On pense que dès le néolithique (-6000 à -2000 environ en Europe méridionale), les hommes ont commencé à concevoir ce qu'on appelle aujourd'hui le temps. Pas la seconde, bien sûr, ni la minute, même pas l'heure en général ne les intéressaient. La date simplement les préoccupait. En effet, c'est à cette époque qu'a lieu la sédentarisation. Les hommes deviennent alors agriculteurs et éleveurs. Ils avaient donc besoin de leur position temporelle par rapport à l'année pour organiser leur vie agricole et pastorale puis politique et religieuse. Ils n'avaient donc pas besoin de plus de précision à cette époque.

Fig.1. *Lever héliaque de la constellation d'Orion. La gravure est orientée plein est comme le véritable astérisme (ph N. Cugnet).*

La notion de temps est souvent associée à un changement récurrent comme l'alternance du jour et de la nuit ou le retour régulier des saisons et des constellations dans le ciel nocturne. L'observation des constellations dans le ciel est un fait avéré dès cette époque comme le montre cette gravure d'Orion datant de la fin de l'âge de bronze. Les Pléiades, Orion et la Grande Ourse étaient souvent représentées par les hommes du néolithique quel que soit le lieu où ils vivaient car elles sont bien brillantes et caractéristiques. Pour Orion et les Pléiades, leur lever héliaque correspondait à des dates précises et permettait de rythmer l'année. Actuellement ces dates ne sont plus les mêmes à cause du phénomène de précession, ce qu'on peut le vérifier facilement avec les élèves grâce à un logiciel comme Stellarium qui prend en compte ce phénomène de précession.

Ils avaient aussi remarqué que le Soleil ne se levait pas et ne se couchait pas au même endroit au cours de l'année notamment aux points extrêmes que sont les solstices.

On pense que le premier cadran est un gnomon, simple bâton vertical autour duquel l'ombre qu'il projetait au sol tournait au cours de la journée suivant le déplacement du Soleil. Aussi, l'homme s'est aperçu que l'ombre du bâton avait toujours la même direction nord lorsque le Soleil culminait quel que soit le moment de l'année et le lieu. Ils ont aussi pu constater que c'est à ce moment que l'ombre est la plus courte. De plus, au lever et au coucher du Soleil, cette ombre était perpendiculaire à cette direction NS pour deux dates, appelées dès l'antiquité équinoxe. On a ainsi les quatre points cardinaux. Les hommes commencent à se situer dans l'espace.

Ce qui était valable pour le bâton est généralisable à tout : on peut se servir d'un élément du paysage, d'un relief, d'un décor, d'une montagne, d'un arbre

ou encore d'un objet. On trouve des cadrans vieux de 4 000 ans dans la vallée des Merveilles, composés d'une ou plusieurs gravures exécutées sur des roches généralement rouges.

Ces cadrans datent de l'âge du bronze ancien. On peut l'affirmer parce qu'on sait reconnaître les armes représentées et les rattacher à une époque.

Ces cadrans auraient été réalisés pour figurer des dates. Ce serait donc des calendriers.

En effet, étudions trois poignards figurés sur la dalle dite de la danseuse qui compte une dizaine de gravures orientées vers le couchant. Ces trois poignards (A1, B1 et D) sont de taille habituelle pour cette époque. Les hommes de l'âge du bronze déposaient un poignard en guise de gnomon sur la gravure et visaient le Soleil. Pour chaque poignard, leur ombre s'aligne avec leur représentation allongée pour le 8 septembre au coucher du Soleil (l'ombre de D s'aligne alors avec le corniforme E).

On peut remarquer qu'actuellement les bergers descendent de cette vallée autour du 10 septembre

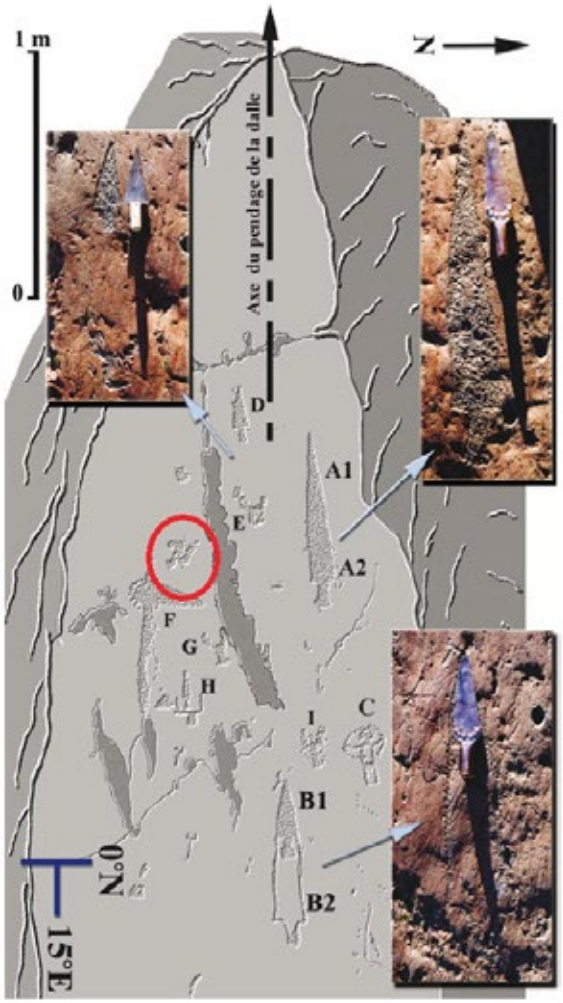


Fig.2. *Dalle dite de la Danseuse (Photo J. Magail).*

pour ne pas se faire surprendre par le froid. Les hommes repéraient donc là une date importante pour leur vie pastorale. Il faut savoir que ce site est inaccessible en hiver. On remarque sur la même dalle des cupules (points) dont la forme générale fait penser aux Pléiades (entourées en rouge). En effet, elles apparaissaient alors se levant à l'est à cette date environ 1 h 30 après le coucher du Soleil. Ceci prouve l'observation du ciel nocturne à cette époque.

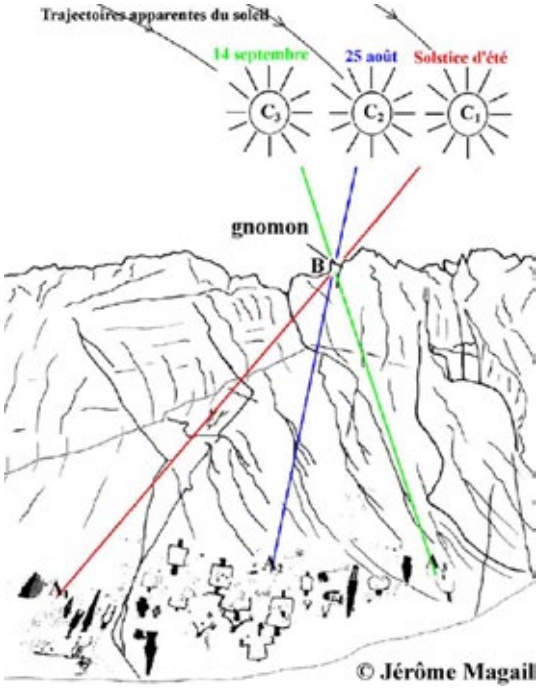


Fig.3. *Roche gravée de la zone IV faisant office de calendrier solaire. La direction de l'ombre du gnomon au cours de la saison y est représentée (Croquis J. Magail).*

D'autres cadrans se trouvent sur le site.

Parfois ces calendriers solaires prenaient encore plus d'ampleur comme sur cette autre roche. Elle a été gravée dans le but de marquer plusieurs dates de la saison estivale.

L'étude de l'ensemble de cet instrument de mesure du temps complexe a été faite par Jérôme Magail, docteur en anthropologie à Monaco.

Elle a révélé que cette série correspond à la période qui s'étend du solstice de juin au 14 septembre. En haut du bloc rocheux (à 2 mètres du sol environ), une pointe d'environ 20 cm de hauteur a été taillée par la main de l'homme. C'est elle qui sert de gnomon.

Les gravures de cette composition ne nous livrent pas leur signification mais on peut penser que certaines correspondaient à des rites, d'autres à des étapes de la vie pastorale des bergers d'alors.

Pour quitter la vallée des Merveilles, on peut encore évoquer le monumental cromlech de Stonehenge

pour ne citer que le plus célèbre. On remarque que nombre de ces lieux cultuels étaient aussi des observatoires solaires permettant de mesurer, diviser le temps.

De tout ceci, on peut en déduire que l'homme du néolithique avait déjà une conception affinée de la mesure du temps, de la régularité du mouvement du Soleil et des étoiles au cours de l'année et qu'il s'en servait pour mesurer le temps, le diviser, en comptant les jours entre deux événements solaires ou stellaires identiques, il avait accès à l'année. Un travail similaire pouvait être mené sur les cycles lunaires.

L'antiquité du temps

On a tendance à penser que pendant l'Antiquité les instruments de mesure du temps étaient sommaires, peu inventifs voire inexistants. Or des sites comme le champ de Mars à Rome ou la tour des vents à Athènes remettent en cause ces idées reçues.

Les instruments de mesure du temps faisaient partie intégrante des habitudes antiques : l'heure régissait de nombreux aspects de la vie quotidienne, tant privée que publique. Toute cité se devait de posséder plusieurs instruments publics, rudimentaires ou complexes et monumentaux.

Fig.4. *Reconstitution du tracé et de l'obélisque du champ de Mars à Rome. L'obélisque se trouve actuellement sur la place Monteciterio (parlement) (Photo M. Lalos).*

Le cadran solaire pouvait présenter des informations supplémentaires comme celui du champ de Mars qui indiquait la date.

Dans l'Antiquité, les peuples du pourtour méditerranéen partageaient en 12 heures de jour la durée séparant le lever du coucher du Soleil, et en 12 heures de nuit la durée séparant le coucher du lever du Soleil. De cette façon, l'heure de jour n'était en général pas égale à l'heure de nuit, et leur durée était variable au cours de l'année.

Un exercice à faire avec les élèves est de montrer que ces heures n'avaient pas la même durée au cours de l'année. Il faut donc chercher les heures de lever et de coucher du Soleil. Ces calculs ne sont valables que pour un lieu donné. À Nice, par exemple :

- Au solstice de décembre : le Soleil se lève à 08 h 04 et se couche à 16 h 52, ce qui fait 8 h 48 de « jour ». Une heure de jour durait donc 44 de nos minutes actuelles. Une heure de nuit valait 1 heure et 16 minutes actuelles.
- Lors du solstice d'été (toujours à Nice), le Soleil se lève à 05 h 53 et se couche à 21 h 12, ce qui fait une journée de 15 h 19. Une heure antique en journée dure donc 1 heure et 16 minutes actuelles.

On parle d'heure temporaire car la durée de chaque heure varie non seulement au cours de l'année mais aussi au cours de la journée.

Hormis les cadrans solaires, il existait d'autres instruments de mesure du temps dans l'Antiquité. Par exemple, une clepsydre, une horloge à eau, était utilisée lors des procès pour limiter le temps de paroles de chaque avocat.

Le temps au Moyen Âge

Durant cette période, on a utilisé les cadrans canoniaux qui avaient pour fonction d'indiquer des heures de prières. Les « heures » qu'ils indiquent sont définies par les canons (les règles) de l'église.

Ces cadrans étaient conçus dans les églises et les monastères. Ils rythmaient donc la vie religieuse de la communauté en marquant les heures des prières au cours de la journée. L'ombre du style arrive sur les lignes au moment des prières. On les voit apparaître sur la façade des églises dès le VIIIe siècle après J.-C. Ce sont généralement des cadrans verticaux à style droit (horizontal) formé d'un demi-cercle divisé en 4, 6, 8 ou 12 secteurs égaux suivant la confrérie.

La précision horaire de ce type de cadran est inexistante car le style, horizontal et perpendiculaire

Fig.5. *Cadran canonial de l'église de Péreuil (16) en forme de demi-cercle et divisé en 4 secteurs. Il peut indiquer 12 heures (Photo M. Lalos).*

à la paroi de l'édifice sur lequel il est fixé, n'est pas un style polaire, la façade sur laquelle il est tracé n'est pas forcément orientée plein sud[1].

On n'en trouve pas dans les Alpes-Maritimes car ils ont sûrement été remplacés par des cadrans à heures régulières au fur et à mesure. La sixième heure de la journée (prière de sexte) correspond à l'heure de midi.

Les cadrans solaires tels qu'on les connait actuellement

Les 17e, 18e et 19e siècles ont été l'âge d'or des cadrans solaires malgré l'invention de l'horloge vers la fin du Moyen Âge. Signe de richesse, la mécanique de l'horloge n'était pas parfaite à cette époque et subissait une dérive temporelle plus ou moins importante. Or, en 1641, Louis XIII spécifie qu' : « il faut régler les horloges publiques suivant le cours du soleil » officialisant ainsi l'heure du Soleil (on parle ici d'heures égales, le jour était partagé en 24 h, et non d'heures temporaires). On ajustait donc les horloges presque quotidiennement grâce à un cadran solaire de grande précision. La popularisation des cadrans solaires s'est faite par la voie ecclésiastique. Jusqu'à la fin du 19e siècle, c'est le curé (ou les moines) qui sonne les heures au clocher en regardant l'horloge réglée à partir d'un cadran solaire.

Né sur les églises, le cadran gagne ensuite les façades des édifices publics : mairies, écoles…

Conçu comme un service public pour faciliter la vie sociale et rendre service aux gens de l'extérieur, le cadran se privatise dans le courant du 19e siècle. Il devient un moyen d'afficher son rang social, ses armoiries, sa devise et ses goûts. Il envahit aussi les lieux clos, les cours et les jardins.

De plus, par convention et par habitude, on a choisi comme sens de rotation des aiguilles le même que le sens du déplacement sur un sol horizontal de l'ombre autour d'un gnomon. Si les horloges avaient été inventées par un peuple de l'hémisphère sud, elles auraient tourné dans l'autre sens !

Aux 18e et 19e siècles, des cadraniers piémontais ont arpenté les Alpes du Sud avec leurs instruments, leurs couleurs naturelles et leur matériel scientifique. Très caractéristiques, on reconnaît leurs cadrans car ils sont réalisés selon la technique de la fresque (peinture réalisée sur un enduit non sec). Ces cadraniers se révèlent être aussi de vrais poètes avec leurs devises pieuses ou païennes rédigées en français, en latin ou en dialecte local. Ils utilisaient des couleurs d'origine minérale comme l'ocre et la terre de Sienne.

Sur ce cadran du monastère de Saorge datant de 1880 (le plus récent du site), on peut lire la devise suivante : « A me il sole a te lo studio ». Le cadran s'adresse ainsi aux frères franciscains : « À moi le Soleil, à toi l'étude », un peu en les narguant.

Fig.6. *Cadran le plus récent du monastère de Saorge situé à la base du clocher. C'est le seul cadran de ce site comportant une devise encore visible (n°2 sur le plan) (Photo N. Cugnet).*

Les cadrans du monastère de Saorge

Ancien couvent franciscain, ce site est un remarquable témoin de l'architecture baroque dans un état de conservation exceptionnel. L'édifice est classé au titre des monuments historiques depuis 1917. Depuis 2001, le monastère est destiné à recevoir des écrivains, traducteurs, scénaristes et compositeurs de musique. La partie résidentielle du monument est désormais ouverte à des retraites d'écriture, ainsi qu'à des séminaires, colloques, ateliers d'écriture ou de traduction.

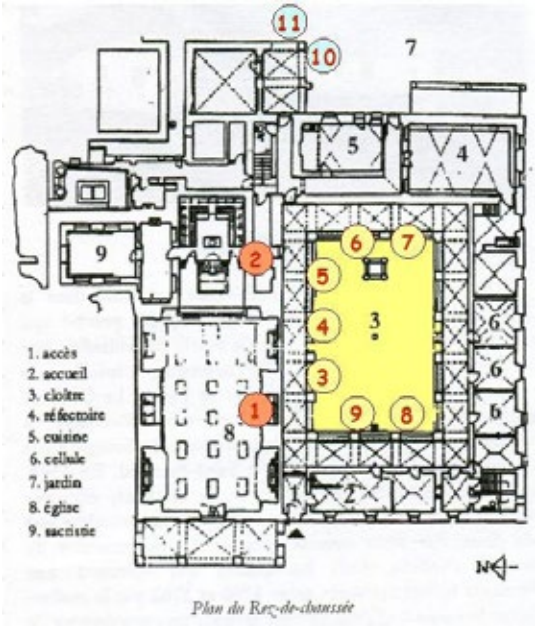


Fig.7. *Plan du monastère avec la position des 11 cadrans.*

1 Pour les cadrans à style polaire, voir par exemple le n° 134 des CC (2011).

À Saorge, 11 cadrans verticaux ont été peints sur le monastère entre les 17e et 19e siècles dont la plupart ont été restaurés en 1990 par le fresquiste Guy Ceppa.

On y trouve le plus vieux cadran des Alpes-Maritimes qui date de 1668.

Fig.8. *Le plus vieux cadran du monastère (n° 1 sur le plan, daté de 1668) (Photo N. Cugnet).*

Pour chacun de ces cadrans, le style est perpendiculaire au mur sur lequel la table est tracée. C'est l'extrémité de l'ombre de la pointe du style droit, qui indique l'heure solaire du lieu (heure vraie locale). La longueur du style doit être calculée par l'artisan cadranier. Le temps solaire vrai est fondé sur le jour solaire vrai qui est la durée entre deux retours successifs du Soleil au méridien local.

On remarquera le style baroque de la plupart de ces cadrans et les décors qui rappellent le temps qui passe.

Fig.9. *Cadran n° 6 orienté vers l'ouest, présentant un décor de sablier (Photo N. Cugnet).*

Les rubans composant le décor de ces cadrans ont comporté des indications écrites, sûrement des devises, mais qui ont été perdues avant la restauration de ces derniers.

Fig.10. *Cadran n° 7 comportant un crâne (Photo N. Cugnet).*

■

Une date à retenir

L'assemblée générale du CLEA se déroulera à La Rochelle,

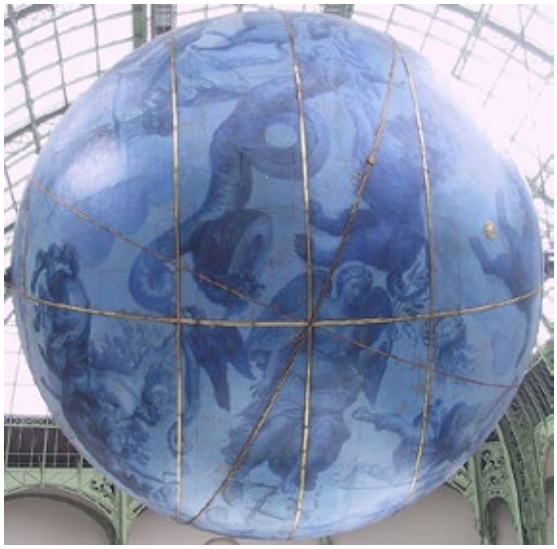
le dimanche 31 mars 2019

au Muséum d'Histoire naturelle

Vous recevrez des informations plus précises en temps voulu.

THÈME

LES REPRÉSENTATIONS DU CIEL

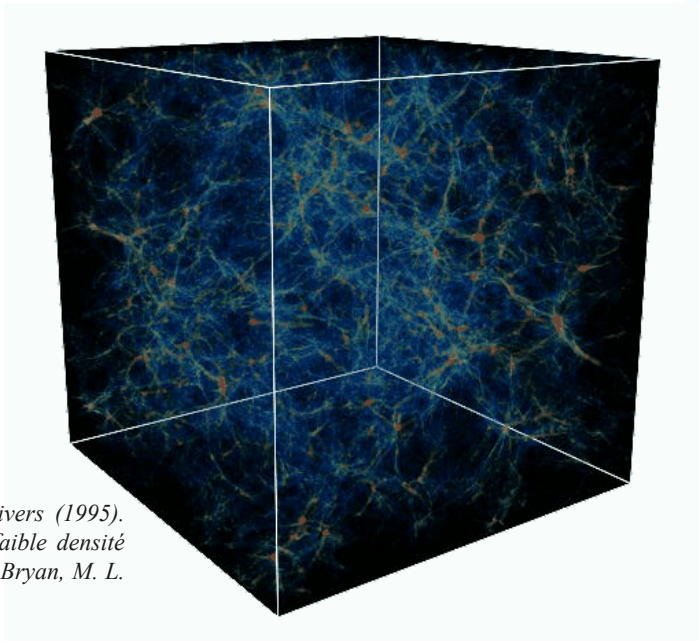


Globe céleste de Coronelli photographié au Grand palais (il est maintenant à la BnF François Mitterrand). On peut représenter le ciel sur une sphère sans déformation. Principal inconvénient, il faudrait se placer en son centre pour voir les étoiles telles qu'elles nous apparaissent depuis la Terre. (Photo Khardan/Wikimedia Commons).

Fig. 32. — La Cassiopée de l'atlas de Bayer (1603).

La constellation de Cassiopée de l'atlas de Bayer (1603) représentée dans l'Astronomie Populaire de Camille Flammarion. Johann Bayer établit le premier grand atlas à partir des positions d'étoiles de Tycho Brahe. On peut être surpris pas l'étoile très lumineuse sur la gauche : il s'agit de la supernova de 1572.

Carte d'Argelander de la région d'Orion (1843). Les dessins des constellations se font ici très discrets, l'importance est donnée aux étoiles. Argelander fera ensuite une carte où les représentations des constellations auront complètement disparues. (Image Linda Hall Library).



Une des premières représentations en 3D d'une partie de notre Univers (1995). Le cube mesure 500 millions d'années-lumière de côté. Les gaz à faible densité apparaissent en bleu et les gaz à haute densité en rouge (image G. L. Bryan, M. L. Norman, UIUC, NCSA, GC3).

Cartes du ciel, cartes de la Terre

Michel Bobin, Pierre Causeret

Il existe de très nombreuses manières de représenter la sphère céleste ou la surface du globe terrestre. Cet article en plusieurs parties se propose d'étudier les principales projections utilisées ainsi que leurs propriétés.

Une projection cartographique permet de représenter une sphère $\mathcal{S}$ (d'un espace à 3 dimensions) dans un plan $\mathcal{P}$ (à 2 dimensions). Pour les mathématiciens, c'est une application injective[1] de $\mathcal{S}$ dans $\mathcal{P}$. À titre exceptionnel, un (voire plusieurs) point de $\mathcal{S}$ peut n'avoir aucune image dans $\mathcal{P}$ (du coup, l'application dégénère en fonction[2]). Au lieu de projection cartographique, on dira plus simplement « projection », mais ces projections n'ont a priori rien à voir avec ce que, en maths, on appelle usuellement projection.

Les coordonnées

Un point M d'une sphère $\mathcal{S}$ est classiquement repéré par sa longitude L mesurée par rapport à un méridien origine (sauf aux pôles Nord et Sud qui n'ont pas de longitude) et sa latitude φ (figure 1).

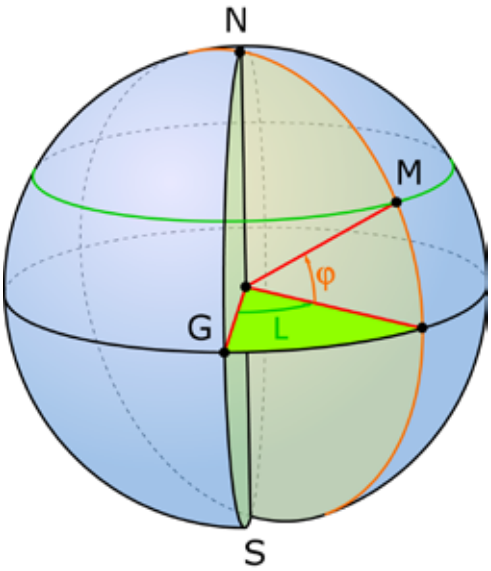


Fig.1. *Coordonnées sphériques.*
La longitude varie de 0 à 360° (ou de -180° à 180°) ou en radians de 0 à 2π (ou de -π à π).
La latitude varie de -90° à 90° ou de -π/2 à π/2.

1 Chaque point M de possède une image unique dans et deux points distincts ne peuvent pas avoir la même image. «Application» se traduit justement en anglais par «map» (carte).
2 Chaque point possède au plus une image.

Coordonnées terrestres et coordonnées célestes

Sur Terre, le plan de l'équateur est le plan de référence pour la latitude qui est comptée de –90° (sud) à +90°(nord). La longitude est mesurée à partir du méridien de Greenwich de –180° à +180° (– à l'ouest, + à l'est, donc dans le sens direct vu du nord).

Dans le ciel, on utilise principalement les coordonnées équatoriales. Le plan de l'équateur céleste sert d'origine pour la latitude qui s'appelle alors déclinaison, mesurée de -90° à +90°. La longitude devient ascension droite et est mesurée de 0 à 24 h (1 h pour 15°) dans le sens direct vu du nord. Greenwich est remplacé par le point vernal situé à l'intersection des plans de l'équateur et de l'écliptique (direction du Soleil à l'équinoxe de printemps).

Dans le Système solaire, on utilise aussi les coordonnées écliptiques. Le plan de l'écliptique remplace alors le plan de l'équateur et l'on parle de longitude et latitude écliptiques. Le point vernal reste l'origine des longitudes.

Quant aux points du plan $\mathcal{P}$, on les repère :

- soit en coordonnées cartésiennes (x, y), abscisse et ordonnée (figure 2a) ;

- soit en coordonnées polaires (ρ, γ), distance et angle polaires sauf pour l'origine qui n'a pas d'angle polaire (figure 2b).

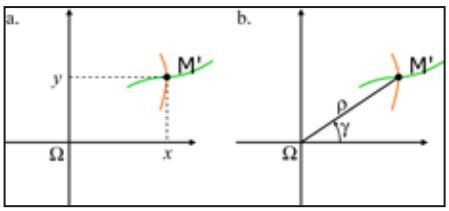


Fig.2. *Coordonnées cartésiennes(a) et polaires (b).*

Dans la suite, on se propose d'étudier les images par différentes projections de la sphère céleste et de la Terre considérée comme sphérique.
Habituellement, on utilise les notations (λ, φ) pour les coordonnées terrestres et (α, δ) pour les coordonnées équatoriales. On utilisera ici la notation (L, φ) pour les deux comme sur la figure 1.

Autre précision, on regarde la Terre de l'extérieur et la sphère céleste de l'intérieur. De ce fait, si on place le nord en haut, les longitudes sont croissantes de gauche à droite sur la Terre mais les ascensions droites sont croissantes de droite à gauche dans le ciel. Pour les cartes célestes, il faudra ajouter un signe – dans les formules donnant l'abscisse.

Premières projections

La plus simple projection qui soit est définie par :

$$x = L \text{ et } y = \varphi$$

C'est la projection quadratique ou projection des cartes carrées. Les pôles Nord et Sud n'ont pas d'image ici.

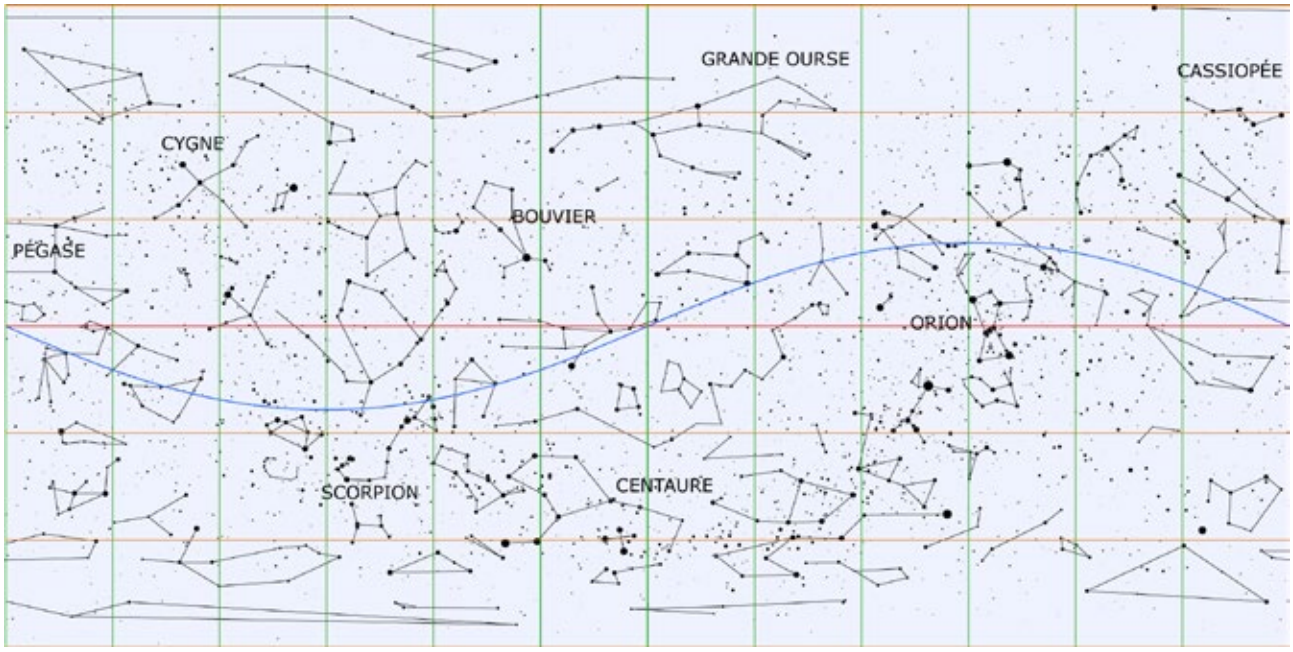


Fig.3. *Carte du ciel en projection quadratique. La carte est centrée ici sur le méridien 180° (ou 12 h). L'abscisse est l'opposé de l'ascension droite, de 0° (ou 0 h) à droite à 360° (ou 24 h) à gauche. L'ordonnée est la déclinaison de l'étoile, de –90° en bas à 90° en haut. L'équateur céleste est représenté en rouge et l'écliptique en bleu.*

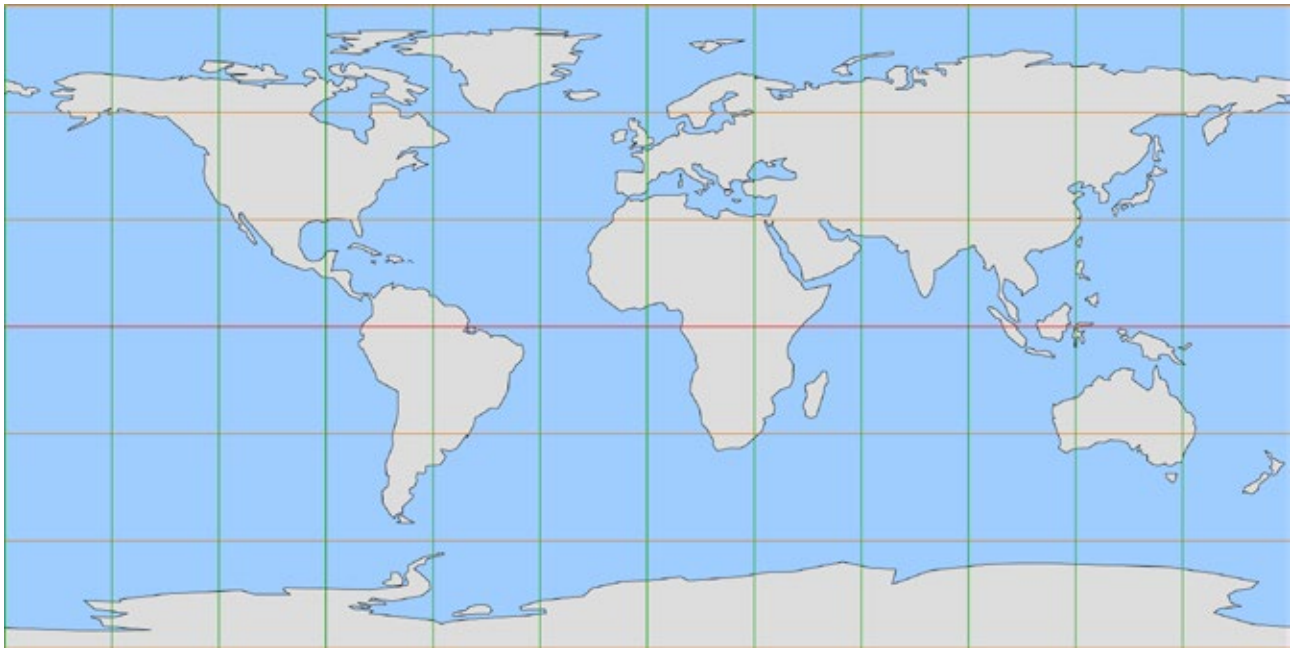


Fig.4. *Carte de la Terre en projection quadratique. L'abscisse est la longitude, de –180° à gauche à +180° à droite. L'ordonnée est la latitude, de –90° en bas à +90° en haut.*

Dans cette projection quadratique, chaque pôle n'est plus un point mais tout un segment et les déformations sont importantes à haute latitude. Pour y remédier, on peut tenter une projection trapézoïdale, en remplaçant chacun des pôles par un point et chaque méridien par deux segments (figure 5).

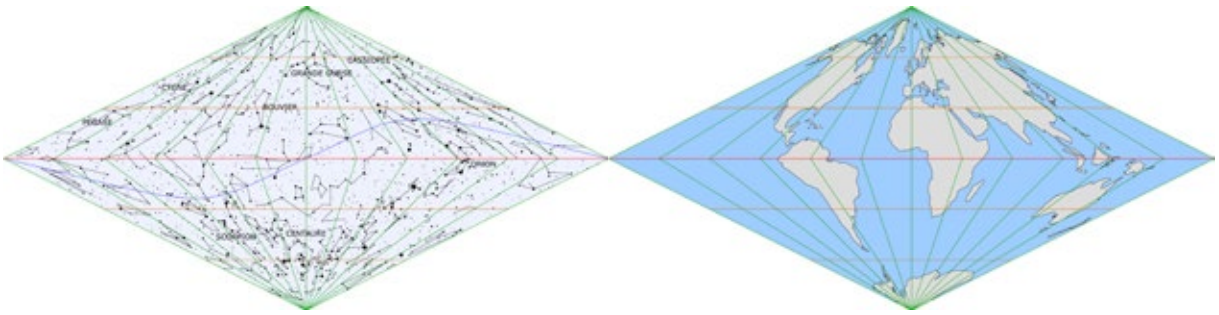


Fig.5. *Ciel et Terre en projection trapézoïdale. Les méridiens sont des segments reliant le pôle à des points de l'équateur régulièrement espacés. Le résultat n'est pas probant et les déformations sont encore importantes.*

Il semble plus logique de décider que la distance le long d'un parallèle entre deux points de même latitude doit être conservée sur la carte.

À la latitude φ, le rayon d'un parallèle vaut R×cos φ et sa longueur 2π×R×cos φ au lieu de 2π×R à l'équateur. R est ici le rayon de la sphère (figure 6).

On va donc remplacer dans les formules précédentes x = L par x = L×cos φ.

On obtient une projection appelée sinusoïdale car les méridiens sont des arcs de sinusoïde. On parle aussi de projection de Flamsteed. Les parallèles, eux, restent des segments.

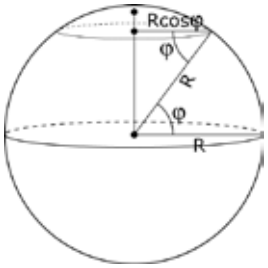


Fig.6. *Rayon d'un parallèle de latitude φ.*

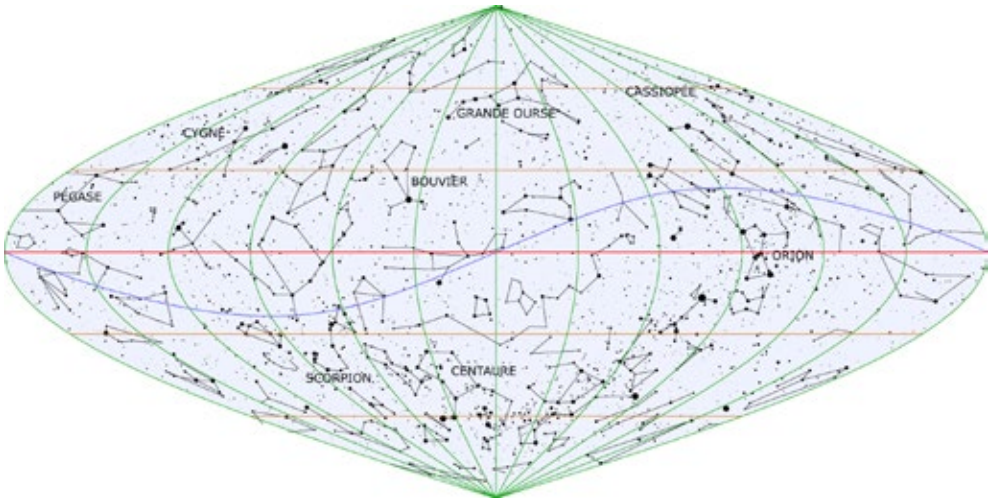


Fig.7. *Carte du ciel en projection sinusoïdale. Les constellations sont peu déformées autour du méridien central. Dans son atlas, Flamsteed a représenté le ciel en plusieurs cartes et non en une seule comme ici. Du coup, il a pu changer de méridien central au fur et à mesure des régions représentées. Pour cela, il suffit de remplacer dans les formules x = L×cos φ par x = (L-L_0)×cos φ où L_0 est l'ascension droite du méridien origine.*

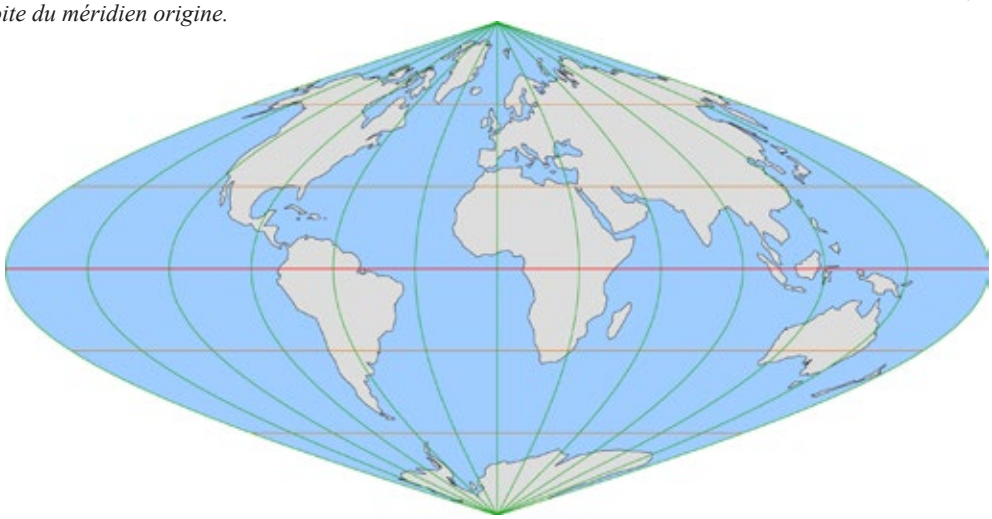


Fig.8. *Carte terrestre en projection sinusoïdale. On a placé le méridien de Greenwich au centre.*

Propriétés des projections

Une projection équidistante conserve les longueurs, du moins sur une famille de lignes.

Par exemple, la projection quadratique (figures 3 et 4) est équidistante sur les méridiens : cela signifie que deux points situés sur un même méridien et espacés d'une certaine distance seront toujours représentés sur la carte par une même distance.

Sur la figure 4 par exemple, 1 mm sur un méridien représente toujours 235 km. Par contre la projection quadratique n'est pas équidistante sur les parallèles : 1 mm représente 235 km à l'équateur mais seulement 204 km à 30° de latitude ou 117 km à 60° de latitude.

La projection de Flamsteed est équidistante sur les parallèles, elle a été construite pour cela, mais elle ne l'est plus sur les méridiens.

Une projection équivalente conserve les aires : deux surfaces de même aire sur la sphère doivent être représentées par deux surfaces de même aire sur la carte. La projection quadratique n'est pas équivalente : l'Antarctique sur la figure 4 est nettement surdimensionné par rapport à l'Europe par exemple. Par contre, la projection sinusoïdale est équivalente.

Une projection conforme conserve les angles, les formes doivent donc elles aussi être conservées. Il suffit d'observer les cartes obtenues en projections quadratique et sinusoïdale pour voir que celles-ci ne sont pas conformes.

	Projection quadratique	Projection de Flamsteed
Images des parallèles	segments parallèles	segments parallèles
Images des méridiens	segments parallèles	arcs de sinusoïde
Longueurs sur un parallèle	non conservées	conservées
Longueurs sur un méridien	conservées	non conservées
Angles	non conservés	non conservés
Aires	non conservées	conservées

Propriétés des projections quadratique et sinusoïdale (ou de Flamsteed).

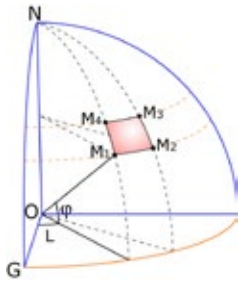
Nous aborderons dans un prochain article d'autres projections, cylindriques, coniques ou azimutales.

Conditions pour une projection équivalente

(avec quelques calculs mathématiques)

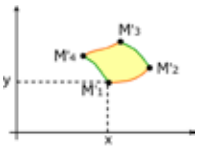
M_1 est un point de la sphère de rayon unité.

M_1 (L, φ)
M_2 (L+ΔL, φ)
M_3 (L, φ+Δφ)
M_4 (L+ΔL, φ+Δφ)
$M_1M_2M_3M_4$ est un «rectangle» élémentaire.



Le rayon du parallèle de M_1 est cos φ
Longueur de l'arc $\widehat{M_1M_2}$ = ΔL×cos φ
Longueur de l'arc $\widehat{M_1M_4}$ = Δφ
Aire de l'élément $M_1M_2M_3M_4$: cos φ×ΔL×Δφ

Comment est transformé cet élément d'aire sur la carte ?
Les arcs de la carte image seront assimilés à des segments deux à deux parallèles. $M'_1M'_2M'_3M'_4$ est donc assimilé à un parallélogramme.



De plus, pour les accroissements, on se restreint au premier ordre : accroissement de la fonction = dérivée×accroissement de la variable.

x et y, les coordonnées de M'_1 sont des fonctions de L et de φ.

Coordonnées des points M'_1, M'_2, M'_3, M'_4 :

$$M'_1:(x,y) \text{ et } M'_2:\left(x+\frac{dx}{dL}\Delta L, y+\frac{dy}{dL}\Delta L\right) \text{ donc } \overrightarrow{M'_1M'_2}:\Delta L\left(\frac{dx}{dL},\frac{dy}{dL}\right)$$

$$M'_1:(x,y) \text{ et } M'_4:\left(x+\frac{dx}{d\varphi}\Delta\varphi, y+\frac{dy}{d\varphi}\Delta\varphi\right) \text{ donc } \overrightarrow{M'_1M'_4}:\Delta\varphi\left(\frac{dx}{d\varphi},\frac{dy}{d\varphi}\right)$$

On peut montrer que l'aire (orientée) d'un parallélogramme ABCD avec $\overrightarrow{AB}$ (a, b) et $\overrightarrow{AD}$ (c, d) est égale à ad − bc, le déterminant de ($\overrightarrow{AB}$, $\overrightarrow{AD}$).

L'aire de $M'_1M'_2M'_3M'_4$ est donc égale à :

$$\Delta L\times\Delta\varphi\times\left(\frac{dx}{dL}\times\frac{dy}{d\varphi}-\frac{dx}{d\varphi}\times\frac{dy}{dL}\right)$$

On compare ce résultat à l'aire de $M_1M_2M_3M_4$ qui valait cos φ×ΔL×Δφ.

Une projection est donc équivalente si et seulement si :

$$\frac{1}{\cos\varphi}\times\left(\frac{dx}{dL}\times\frac{dy}{d\varphi}-\frac{dx}{d\varphi}\times\frac{dy}{dL}\right) \text{ est constant.}$$

Nous disposons donc d'un critère pour vérifier si une projection définie en coordonnées cartésienne est équivalente. Si la projection est définie en coordonnées polaires (ρ, γ), cette condition s'écrira :

$$\frac{\rho}{\cos\varphi}\times\left(\frac{d\rho}{dL}\times\frac{d\gamma}{d\varphi}-\frac{d\rho}{d\varphi}\times\frac{d\gamma}{dL}\right) \text{ est constant.}$$

Vous pourrez chercher vous-même la démonstration.

Application à la projection de Flamsteed

x = L×cos φ et y = φ

$$\frac{dx}{dL}\times\frac{dy}{d\varphi}-\frac{dx}{d\varphi}\times\frac{dy}{dL}=\cos\varphi\times 1+L\sin\varphi\times 0=\cos\varphi$$

La projection de Flamsteed est donc équivalente.

■

ᶜAbd al-Rahmān al-Sūfī et son *Livre des constellations* (964)

Roland Laffitte, auteur de plusieurs ouvrages sur le ciel des Arabes

Roland Laffitte nous emmène à la découverte des superbes représentations des constellations réalisées par al Sufi, maintes fois copiées et recopiées, et que l'on peut aller admirer sur le site de la BnF.

ᶜAbd al-Rahmān al-Sūfī est un des érudits médiévaux de langue arabe les plus connus. Nous savons peu de choses de sa biographie, sauf qu'il a dû naître dans la cité de Ray, près de l'actuel Téhéran en Perse, en 913 comme en témoigne son qualificatif d'al-Rāzī, et qu'il finit ses jours à Chiraz en 986. Son nom semble par ailleurs indiquer qu'il était adepte d'un des courants spirituels de l'Islam que l'on classe sous le terme générique de soufisme. Il vécut à la cour du prince persan ᶜAdhud al-Dawla, gouvernant à Ispahan pour le compte des califes de Bagdad et passionné de sciences. C'est d'ailleurs à lui qu'est dédié le *Livre des constellations* écrit en 964[1], qui fait sa renommée et dont la traduction latine a favorisé en Europe la transmission de l'œuvre de Ptolémée, augmentée de ses apports arabes.

Fig.1. *Copie d'un dessin d'al-Sūfī (Azophi Arabus) d'Albrecht Dürer dans ses Imagines coeli septentrionales, 1515.*

Astronomie grecque et astronomie arabe

Avant al-Sūfī, l'astronomie arabe s'est déjà largement intéressée à Ptolémée. Les premières traductions en sont parvenues de façon indirecte par le syriaque et le persan dès le début du IXᵉ siècle. Mais c'est en 827 que al-Hajjāj ibn Matar, aidé de Sarjūn ibn Hilyā, tous deux de langue arabe mais aussi familiers du grec par leur culture familiale syriaque, livrent la *Composition mathématique* (en grec : *Mathématikḗ sýntaxis*) de Ptolémée sous le titre de *Kitāb al-majistī*, reprenant ainsi un des noms du livre du maître d'Alexandrie, *`ē megístē*, « la très grande [composition] ». C'est cette version qui permettra au traducteur Gérard de Crémone de donner en 1175 à Tolède le texte désormais connu de son nom arabe, l'*Almageste*. À la génération suivante, c'est Ishhak al-ᶜIbādī qui, ayant pris la relève de son père, le célèbre Hunayn, dans son entreprise de traduction du grec, donne une nouvelle version du traité de Ptolémée.

Pris d'enthousiasme pour le défi du calife al-Ma'mūn de rassembler toutes les connaissances connues à l'époque, les savants du monde islamique convergent vers Bagdad dans les années 820 pour récolter le maximum de textes scientifiques écrits en sanskrit, persan, syriaque et surtout en grec. L'astronome Yahya ibn Abī Mansūr construit à Bagdad l'observatoire d'al-Shamāsiya où il coordonne une équipe chargée de passer au crible les données fournies par Ptolémée et produit en 833 *al-Zīj al-mumtahan*, soit « les Tables vérifiées », qui ne nous sont hélas pas parvenues. C'est à la même époque que, s'appuyant sur ces résultats, al-Farghānī, l'Alfarganus des clercs latins, publie un *Jawāmiᶜ ᶜilm al-nujūm* ou « Compendium de la science des étoiles », qui sera traduit en latin au XIIᵉ siècle et publié en texte bilingue par l'orientaliste allemand Jacob van Gool (Golius) en 1541. Deux générations plus tard, c'est au tour d'al-Battānī, l'Albatenius des Latins, de reprendre de façon critique en 888 *l'Almageste* de Ptolémée sous le titre de *Kitāb al-Zīj al-Sābī'*, soit « Livre des Tables du Sabéen », ce qui s'explique par le fait qu'il est, comme son contemporain Thābit ibn Qurra, le Thebith des Latins, d'ascendance sabéenne, une des confessions non-islamiques reconnue par les musulmans. Cet ouvrage, qui sera également traduit en latin au XIIᵉ siècle et publié par l'orientaliste Carlo Alfonso Nallino en 1899-1907, sera prisé par l'astronome allemand Johannes Müller von Königsberg (Regiomontanus) et sera largement cité par Nicolas Copernic.

1 Le titre arabe est *Kitāb suwar al-kawākib al-thābita*, littéralement « Livre des figures d'étoiles fixes ».

L'apport astronomique d'al-Sūfī

ᶜAbd al-Rahmān al-Sūfī est donc loin d'être le premier à se livrer à l'exercice d'adaptation de Ptolémée aux données astronomiques du jour, mais il le fait de façon extrêmement originale. Bien entendu, il effectue à son tour les vérifications des éléments fournis par son illustre prédécesseur, donne sa propre mesure de l'obliquité de l'écliptique et précise le point vernal, consigne enfin ses propres mesures des coordonnées stellaires. Mais c'est dans la présentation des résultats qu'il se distingue. À la différence d'al-Battānī, il suit très fidèlement le catalogue de Ptolémée, où les étoiles sont classées selon les 48 constellations qui formatent le ciel grec depuis Hipparque. Pour chaque étoile, sont indiquées la longitude, la latitude et la magnitude apparente. Surtout, les tables elles-mêmes sont accompagnées d'un ample commentaire qui situe les étoiles dans leur figure grecque (des exemples en sont donnés plus loin dans cet article), et les distances entre elles sont indiquées en coudées et en doigts. En observant la voûte céleste le livre en mains, le lecteur peut ainsi les situer facilement. Al-Sūfī note de plus de façon systématique si la magnitude diffère de celle consignée par Ptolémée, relève la couleur des étoiles les plus importantes et mentionne celles qui figurent sur l'astrolabe.

Fig.2. *La constellation des Gémeaux chez al-Sūfī (Bibliothèque publique de New York).*

Bien que l'on attribue souvent la découverte de la galaxie d'Andromède à l'astronome allemand Simon Mayr (Marius) en 1612, al-Sūfī la mentionne ainsi dans son *Livre* : Les Arabes « ont trouvé deux séries d'étoiles qui entourent la figure du Poisson septentrional […]. Elles appartiennent soit à la figure d'Andromède, soit à celle des Poissons que Ptolémée a décrit dans la 12ᵉ partie du zodiaque. Ces séries commencent à la tache nébuleuse [en arabe : *latkha sahābiyya*] située très près de la 14ᵉ étoile qui se trouve dans le côté droit et qui appartient aux trois qui sont au-dessus de la Ceinture d'Andromède ».

Autre élément inconnu de Ptolémée : « Certains disent que *Qadamā Suhayl* [soit "les Pieds de Suhayl"] sont au-dessous de Suhayl ». Si l'on sait que Suhayl est le nom traditionnel arabe de Canope, il n'est pas difficile de voir là un des noms de la formation aujourd'hui nommée Grand nuage de Magellan. En fait, si les Européens ne mentionnent cet objet céleste qu'à partir des récits du voyage autour du monde du navigateur portugais en 1521, c'est seulement à la fin du XIXᵉ siècle qu'ils lui seront dédiés par l'astronome étasunienne Maria Mitchell, mais ces Nuages sont connus depuis l'Antiquité. Si l'on en croit l'orientaliste Louis Massignon, l'astrologue Teukros de Babylone conseillait au Iᵉʳ siècle de notre ère, de « regarder (pour guérir), le pôle Sud lui-même, et les deux petits corps célestes à ses côtés tout en regardant Canope ».

À côté de ses tables astronomiques, al-Sūfī écrit, comme la plupart des astronomes de son époque, une *Risāla fī l-ᶜamal al-asturlāb*, ou « Épître sur l'usage de l'astrolabe », dont la Bibliothèque nationale (BnF) possède une copie (référence Arabe 2493).

L'apport culturel d'al-Sūfī

Le traité d'al-Sūfī est l'un des plus célèbres dans le monde arabe et islamique avant l'ère moderne. Une des raisons de sa célébrité tient à ce que la description qu'il fait des constellations de Ptolémée s'accompagne de dessins de belle facture. La BnF possède une dizaine de copies du texte arabe. Un des plus célèbres est l'exemplaire calligraphié pour Ulugh Beg, le petit-fils de Tamerlan, lui-même astronome et à qui nous devons un catalogue d'étoiles fameux, qui sera traduit et publié par l'orientaliste anglais Thomas Hyde en 1665. Dans ce manuscrit (référence Arabe 5036[2]) comme dans certaines autres copies, chaque figure est donnée deux fois, la première vue de l'intérieur de la voûte céleste, et la seconde, de façon symétrique et surplombante, telle qu'elle apparaît sur les globes célestes (voir figure 3). Les dessins les plus beaux sont peut-être ceux que livrent, dans le style persan, plusieurs manuscrits du XVIᵉ siècle disponibles sur Gallica ou celui de Saint-Pétersbourg, étudié et traduit en français en 1874 par l'astronome danois Hans Schjellerup, depuis peu en ligne sur Google. Ces illustrations sont une des raisons du succès de la diffusion de ce texte en Europe, par deux voies, l'andalouse et la sicilienne : j'en veux pour preuve le graphisme des constellations médiévales qui s'inspirent largement de celles de style palermitain, que l'on trouve dans les premières traductions d'al-Sūfī, dont un exemple est donné par le Sufi latinus (ms. Bnf, Arsenal 1036), consultable sur Gallica.

2 Pour consulter ce manuscrit, il suffit d'aller sur le site https://gallica.bnf.fr, de cliquer sur la loupe et de taper Arabe 5036 dans la fenêtre de recherche. Vous pouvez alors feuilleter le manuscrit ou le visualiser en mosaïque.

Fig.3. *La constellation du Sagitaire dans le manuscrit d'Ulugh Beg (ms. BnF ar. 5036). Elle est représentée à gauche, vue de l'extérieur de la sphère céleste et à droite, vue depuis la Terre.*

Pourtant, même si la valeur artistique de ces illustrations est indéniable, ce n'est pas là que réside l'intérêt culturel majeur du livre d'al-Sūfī. C'est dans le fait qu'à côté de la description du ciel ptolémaïque, l'astronome persan livre une description du ciel tel qu'il est vu de façon traditionnelle par les Arabes, ce que nous avons pu deviner à la lecture des passages cités plus haut. Il prend soin d'identifier les noms d'étoiles livrés par l'astronomie antique arabe, telle que nous la connaissons par des érudits qui, comme Ibn Qutayba ou Abū Hanīfa al-Dīnawarī, ont consigné, au IXe siècle, les traditions populaires arabes et dont les textes ne sont hélas pas traduits en français. Les Arabes ont très tôt élaboré des calendriers grâce aux positions remarquables d'une bonne vingtaine d'étoiles ou astérismes caractéristiques. En ce sens, ces calendriers dits des *anwā'* (singulier : *naw*), mot qui signifie au départ « levers stellaires », étaient parfaitement comparables aux *parapegmes* grecs ou syriens. Dans un deuxième temps, les Arabes sont passés à un calendrier plus sophistiqué, élaboré à partir des 28 *manāzil al-qamar* ou « stations de la Lune », c'est-à-dire les étapes successives de la Lune dans son cours céleste proche de l'écliptique, chacune nommée par son *naw* auquel était attaché une série de dictons et proverbes météorologiques et astrologiques. À commencer par le couple *αβ Ari*, *al-Sharatān*, littéralement « les Marques », celles qui indiquaient à l'époque l'entrée dans l'équinoxe du printemps, d'où l'astronome italien Giuseppe Piazzi a tiré au début du XIXe siècle le nom de Sharatan pour *β Ari*.

Ceci n'est pas anodin : toutes les stations lunaires ont donné, grâce aux traductions latines, des noms d'étoiles dans les atlas et catalogues d'abord européens puis internationaux. Ce qui est frappant, c'est qu'à l'heure où les astronomes arabes ont adopté avec *l'Almageste* le formatage du ciel selon les constellations grecques, les appellations des étoiles les plus prestigieuses étaient déjà tellement ancrées dans l'imaginaire arabe qu'elles ont en général été conservées. Pour les besoins de l'astrolabe et des tables astronomiques, les astronomes arabes ont aussi nommé quantité de nouvelles étoiles selon leur situation dans les constellations grecques. Pour certaines, ils ont hésité : c'est le cas d'*α Per* qui porte deux noms : *Mirfaq al-Thurayya*, « le Coude d'al-Thuraya » à partir de l'astronomie antique et *al-Jamb*, « le Flanc [de Persée] » dans la nomenclature gréco-arabe, ce dont les Européens ont fait Mirfak et Algenib (voir figure 4).

Fig.4. La figure arabe d'al-Thurayyā (composition moderne R.L.) sur l'espace grec correspondant (allant de la Baleine *à* Cassiopée *en passant par le* Taureau *et* Persée*) selon le graphisme du manuscrit de Saint-Pétersbourg, cf. Schjellerup, pl. I-III, fig. 10, 11, 22, 23 et 34).*

Cela fait qu'en somme, sur les plus de 150 noms courants que les catalogues internationaux doivent aujourd'hui aux Arabes et qui constituent à peu près deux tiers des noms stellaires, la moitié viennent de l'astronomie arabe antique, la moitié du formatage grec du ciel par les Arabes.

Il est ainsi possible, en suivant les indications d'al-Sūfī, de dessiner les figures arabes, ce qui n'a été fait que de façon très rare, les astronomes arabes et persans n'ayant, de façon quasi-générale, livré comme images que celles des figures ptolémaïques. C'est à ce travail que je me suis livré dans mes livres sur le ciel des Arabes et sur le site *Uranos* (http://www.uranos.fr). ■

Bibliographie

HAFEZ, Ihsan, *Abd al-Rahman al-Sufi and his book of the fixed stars: a journey of re-discovery*, PhD Thesis, James Cook University Townsville (Queensland, Australia), 2010 (accès en ligne).

LAFFITTE, Roland, *Héritages arabes : des noms arabes pour les étoiles*, Paris : Geuthner, 2002 et 2005 (extraits de passages en ligne sur Google).

LAFFITTE, Roland, *Le ciel des Arabes. Apport de l'uranographie arabe*, Paris : Geuthner, 2012.

MASSIGNON, Louis, *Les Nuages de Magellan et leur découverte par les Arabes*, Paris : Librairie orientaliste Paul Geuthner, 1962. (accès en ligne sur le site http://wwww.uranos.fr).

NALLINO, Carlo Alfonso (éd.), *Al-Battānī sive Albattenii Opus astronomicum*, 3 vol., Milan : U. Hoepli, 1899-1907 (en ligne sur Archive).

SCHJELLERUP, Hans Karl Frederik Christian, *Description des étoiles fixes* […], Saint-Pétersbourg : Eggers et Cie, 1874, reproduit dans SEZGIN, Fuat, *Islamic mathematics and Astronomy*, vol. XXVI, Frankfurt am Main : Institut für Geschichte der arabisch-islamischen Wissenschaft an der Johann Wolfgang Goethe-Universität, 1997 (en ligne sur *Google*).

Une fresque pédagogique au XIIIe siècle à Toulouse ?

Josée Sert, Toulouse

Comment se représentait-on le ciel au Moyen Âge ? Cet article nous donne une des réponses de l'époque, avec une fresque correspondant à l'Univers vu par Aristote.

Dans la basilique romane Saint-Sernin à Toulouse, dans un couloir obscur situé dans un contrefort d'une arcade du côté nord, se trouve une étrange fresque du XIIIe siècle. Seule partie, sur toute la longueur du corridor, à être décorée : pour la partie voûtée, un semis d'étoiles et des lignes doubles rejoignant en diagonale les coins inférieurs et supérieurs ; pour la partie verticale, deux représentations circonscrites dans des cercles. De l'une, très abîmée, ne restent, en bas à droite, que ce qu'on devine être des représentations de nuages et de vents, l'autre, détériorée seulement sur sa partie supérieure, est une représentation géocentrique du monde.

Toulouse au XIIIe siècle est le lieu d'une intense vie intellectuelle :

- en 1229, Grégoire IX fonde l'Université de Toulouse qui, contrairement à la Sorbonne, est autorisée à enseigner le droit civil et la physique d'Aristote ;

• Dominique dit de Guzman : il fonde en 1216 l'ordre des Dominicains (invités à s'instruire sans relâche : chaque couvent a un *studium* et chaque province un centre d'études), qui accompagnera la création de cette université. Thomas d'Aquin, entré dans l'ordre en 1244, a écrit des Commentaires des œuvres d'Aristote ;

• des traductions d'Aristote en latin sont disponibles : au XIe siècle en Sicile du grec ou de l'arabe, de Gérard de Crémone au XIIe (de l'arabe, à Tolède), de William de Moerbeke au XIIIe (du grec), adaptées au christianisme par Thomas d'Aquin. On connaît[1] Aristote, Ovide, Hippocrate, Alfragranus[2]…, preuve de la circulation des connaissances dans le monde médiéval.

Les maîtres dominicains, en particulier Thomas d'Aquin, furent pour beaucoup dans la redécouverte de *Du ciel*, adopté comme partie de la philosophie aristotélicienne et longtemps référence dans les discussions cosmologiques. On peut donc penser

L'ensemble de la fresque.

1 Noms cités dans des manuscrits du XIIIe siècle conservés à Toulouse

2 Astronome et mathématicien perse du IXe siècle, il écrivit des éléments d'astronomie inspirés de l'Almageste de Ptolémée et fut traduit au XIIe à Tolède.

que les deux fresques puissent être issues des écrits d'Aristote, *Traité du ciel* et les *Météorologiques*…

La fresque astronomique correspond à la présentation d'Aristote[3], qu'il argumentait par des considérations philosophiques et justifiait parfois par des résultats d'observations. Ses argumentations, relevant d'une très grande maîtrise des théories antérieures et souvent consacrées à leur réfutation, sont parfois difficiles à suivre (les principes posés sur lesquels elle repose sont pour nous très étranges[4]), mais il est très intéressant de voir la connaissance qu'il avait des observations ou de la science astronomique égyptienne, babylonienne ou grecque auxquelles il fait allusion.

Dans le livre II du *Traité du Ciel*, Aristote établit que :

• l'Univers est sphérique, fini, en mouvement circulaire uniforme (diurne), c'est le mouvement le plus rapide. Il est mû par un moteur extérieur ;

• la Terre est sphérique[5] et immobile au centre ;

• les autres objets célestes sont sphériques[6], en mouvement circulaire, d'autant plus rapides qu'ils sont près du centre (portés sur leur cercle en sens opposé au plus rapide, ils sont moins « ralentis » s'ils en sont plus éloignés). D'où l'ordre Lune, Mercure, Vénus, Soleil, Mars, Jupiter, Saturne, avant la sphère des étoiles fixes[7] ;

• celui des pôles au-dessus de nous est la partie basse de l'Univers, celui caché en est le haut.

La Terre est au centre de la fresque, avec le nord en bas et les continents juste nommés. Huit positions de la Lune sont dessinées, avec des aspects discutables.

3 Bien que le système de Ptolémée soit connu (en témoigne le nom d'Alfragranus mentionné au XIIIe à Toulouse), l'ordre médiéval s'en tient à la représentation « simple » d'Aristote adoptée par l'Église et vulgarisée par les Dominicains.

4 Les principes posés comme base ne sont pas d'ordre scientifique, mais esthétique ou métaphysique (perfection par exemple).

5 Forme de l'ombre lors d'éclipses de Lune.

6 La Lune : observation des formes de l'éclairement lors d'une lunaison, de sa forme lors d'éclipses de Soleil.

7 Ordre justifié aussi par exemple par l'observation de Mars passant « sous » la Lune à moitié pleine (disparaissant sous le côté obscur), et celles des Égyptiens et Babyloniens pour d'autres planètes.

Sur la fresque, le haut de l'Univers étant vers le haut, le nord de la Terre est vers le bas. L'Afrique est donc représentée au-dessus de l'Europe, l'Asie à l'est, donc à gauche. Cette disposition est très fréquente dans les représentations médiévales.

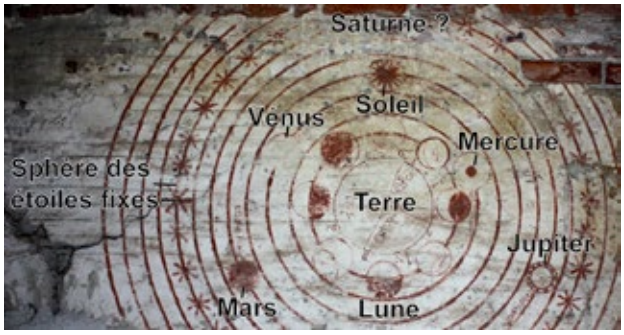
On peut donc voir les cercles portant les objets célestes, et il est probable que Saturne, que l'on ne voit pas, devait se trouver dans la partie abîmée, tout en haut de son cercle, peut-être en hommage à Saint-Sernin (Sernin = Saturnin). Jusqu'à la sphère des étoiles fixes. Et au-delà…

Plusieurs remarques ou questions cependant :

• Aristote situait au-delà du cercle des étoiles fixes le Premier Mobile (ou Moteur). L'ordre céleste médiéval comporte le plus souvent deux cercles au-delà de celui des étoiles fixes : le ciel cristallin et l'Empyrée ou trône de Dieu. Pourquoi deux cercles supplémentaires sur la fresque de Saint-Sernin ? Un déchiffrage plus poussé des inscriptions permettrait peut-être d'avoir des éléments de réponse, mais la partie supérieure n'est pas en bon état ;

• la Lune est représentée par huit figures, sur lesquelles on a parfois une partie sombre, parfois une ligne délimitant deux zones. D'autre part, la forme et la position des arcs pourrait figurer pour certaines des phases, pour d'autres des éclipses. Et ceci sans rapport avec les positions respectives de la Terre, de la Lune et du Soleil ;

• à noter que l'axe de la Terre est incliné.



Les positions des planètes.

Ces fresques étaient sans doute utilisées à des fins pédagogiques et témoignent du fait que la basilique était un lieu de transmission du savoir[8]. Le studium des Dominicains était au couvent des Jacobins, pourquoi cette fresque à Saint-Sernin, qui en est très proche ? Et pourquoi dans un lieu si peu éclairé, si retiré et si difficile d'accès ?

Ces fresques sont en tous cas un magnifique témoignage du développement et de la richesse de la vie culturelle et savante à Toulouse au XIIIe siècle. ■

8 C'est l'avis de Bertrand Ducourau, Conservateur du Patrimoine ayant dirigé sa restauration.

Les représentations du ciel dans les productions du CLEA

Pour prolonger ce thème, vous trouverez des compléments dans les hors-séries et sur notre site (clea-astro.eu). C'est une mine de renseignements, il ne faut pas hésiter à aller y fouiller.

Dans le hors-série n° 11 Les constellations

Vous trouverez un historique des 88 constellations actuelles et des constellations disparues, des légendes, des renseignements sur les projections, des fiches, des maquettes…

Dans les anciens numéros des Cahiers Clairaut (clea-astro.eu/archives).

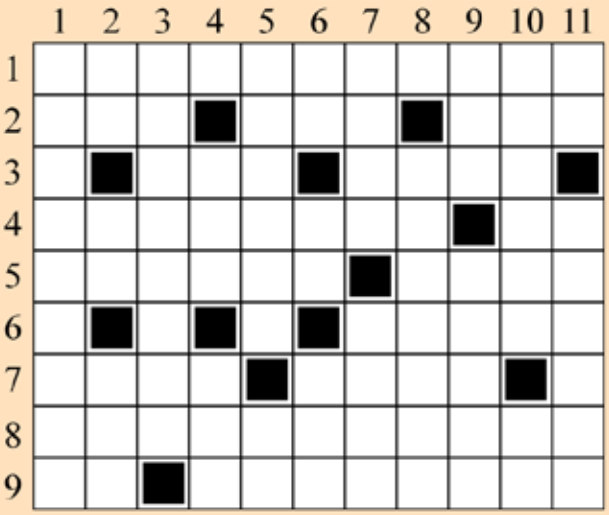
- Le ciel des bergers de Provence n° 157 (2017)
- Constellations chinoises n° 145 (2014)
- Plusieurs articles sur le zodiaque dans le n° 135 (2011)
- Plusieurs articles sur les constellations dans le n° 125 (2009)
- Le ciel des Maoris n° 119 (2007)
- Ce que notre ciel doit aux Arabes n° 114 (2006)
- La chasse à l'Ourse céleste n° 94 (2001)
- Le ciel des catalans nos 86-87-88 (1999)
- La Grande Ourse n° 14 (1981)

Nous rappelons que tous les numéros de plus de 3 ans sont en libre accès, les numéros plus récents sont réservés aux abonnés numériques.

Sur LUNAP (http://clea-astro.eu/lunap)

à l'index constellations : notions de base, origine des noms, activités.

Mots croisés représentations du ciel



Horizontalement

1. Type de projection que l'on utilise parfois pour les cartes du ciel.
2. Elle s'est occupée de Gaia. On en trouve un peu partout dans l'Univers. www.clea-astro.eu par exemple.
3. Actuellement outre-manche. Ce satellite va permettre de faire des cartes du ciel d'une précision inégalée.
4. Comme un quasar. Symbole d'un élément lié à la 8e planète du Système solaire.
5. L'un des premiers à décrire les constellations. Haie désordonnée.
6. Créateur de l'Uranometria.
7. Peut être lumineuse. Peut être diffus.
8. Célèbre atlas céleste.
9. Appris. Habitants d'une planète du Système solaire.

Verticalement

1. Auteur de superbes représentations du ciel.
2. Bretonne sous les eaux. N° 79. Dense.
3. Superamas révélé en 3D.
4. Possèdent. Pour un tableur, 3 pour π.
5. À l'origine de la mécanique céleste. Points opposés.
6. Dizaine. Un. Insecte phonétique.
7. Braillé. Colon.
8. Abattu.
9. Pronom. Constellation étendue.
10. Elle inspira les astronomes. Pas off.
11. L'espagnol. Pour observer en hiver.

Les grands atlas célestes,

documents scientifiques ou objets d'art ?

Roland Trotignon

Comment représenter la voûte céleste ? Faut-il privilégier les figures des constellations ou la position des étoiles ? Quelle projection utiliser, quel système de coordonnées ? Roland Trotignon nous raconte l'histoire des grands atlas célestes du 16e siècle à nos jours et des différentes réponses apportées à ces questions.

De la carte du ciel à l'atlas

Les présentations illustrées du ciel se sont longtemps appuyées sur des œuvres de l'Antiquité. À la fois œuvres astrologiques et albums de gravures, elles se préoccupaient plus de représentations spectaculaires que d'exactitude scientifique. La fantaisie créatrice de l'artiste l'emportait sur la rigueur de l'observateur. C'est ainsi que Grotius publia une réédition illustrée des phénomènes d'Aratos en 1600. Sa magnifique représentation d'Orion comprend dans le bras gauche du chasseur 5 étoiles sorties de l'imagination de l'auteur !

Fig.1. *Orion dans une édition des Phénomènes d'Aratos. Les étoiles sur son bras ou dans son dos sont inventées.*

Parallèlement à la cartographie terrestre qui connut une spectaculaire évolution à partir du 15e siècle, les représentations du ciel donnèrent lieu à la publication de cartes séparées des différentes régions célestes regroupées dans des atlas[1]. Il s'agissait là de donner des images exactes du ciel.

Quelques choix décisifs

Représenter le ciel pose quelques problèmes.

D'où voit-on la voûte céleste ?

La sphère céleste peut être vue de deux façons : soit depuis l'intérieur de la sphère, comme un observateur terrestre (vision géocentrique), soit depuis l'extérieur de la sphère, comme une personne contemplant un globe céleste (vision externe). Les images sont alors inversées. Un observateur cherchant un outil pour contempler le ciel à l'œil nu préfère évidemment la première solution.

Quelle projection choisir ?

L'atlas donne des cartes planes à partir d'une surface sphérique. Cela ne peut se faire qu'au prix de déformations (essayez donc de plaquer une coquille d'œuf sur une feuille de papier !). Les contraintes ne sont pas les mêmes que pour les cartes terrestres qui doivent être adaptées par exemple à la navigation. L'auteur de l'atlas céleste privilégie la facilité de recherche des coordonnées.

Quel système de coordonnées choisir ?

Il existe plusieurs systèmes concurrents qui satisfont des besoins différents. Les atlas pourront indiquer les coordonnées équatoriales ou les coordonnées écliptiques ou même les deux à la fois[2].

1 La dénomination « atlas » est due au géographe Mercator qui intitula ainsi le recueil de cartes publié en 1595.

2 Le plan de référence est le plan de l'équateur en coordonnées équatoriales, le plan de l'écliptique en coordonnées écliptiques.

Les précurseurs : Piccolomini (1508-1579) et Gallucci (1538-1621)

Le premier ouvrage méritant le nom d'atlas céleste fut l'œuvre d'Alessandro Piccolomini. Humaniste et philosophe toscan, Piccolomini publia en 1540 le De le *stelle fisse*, recueil de 47 cartes des constellations, accompagnées en regard de chaque carte de commentaires mythologiques. On ne peut qu'être frappé par l'aspect moderne de ces cartes. Les magnitudes des étoiles sont représentées par des dessins différents ; une échelle figure dans le bas de la carte et les positions relatives des étoiles de la constellation sont correctement dessinées.

Malheureusement il n'est pas possible de retrouver les coordonnées des étoiles.

Les cartes des différentes constellations sont à des échelles différentes.

Fig.2. *La constellation d'Orion par Piccolomini. Les étoiles sont représentées différemment en fonction de leur éclat (nombre de branches et taille) et la plupart d'entre elles sont désignées par une lettre. L'échelle du bas est une graduation en degrés.*

On reconnaît facilement dans la figure ci-dessus la constellation d'Orion. Chaque étoile est indiquée par une petite lettre, progrès qui peut sembler minime mais qui pourtant est essentiel pour qui veut savoir de quelle étoile on parle. Piccolomini a renoncé à surcharger la carte d'une figure mythologique. Curieusement ce choix extrêmement moderne ne sera repris qu'au 19e siècle.

Le *Theatrum Mundi* de Gallucci (1588) faisait figurer les figures mythologiques de façon dépouillée dans les 48 cartes qui composaient cet atlas. Il était facile de retrouver les coordonnées stellaires grâce au rectangle gradué qui entourait chaque carte. La projection trapézoïdale, déjà couramment utilisée à l'époque pour les cartes géographiques, évitait les distorsions trop fortes. Cet atlas fut réimprimé de nombreuses fois.

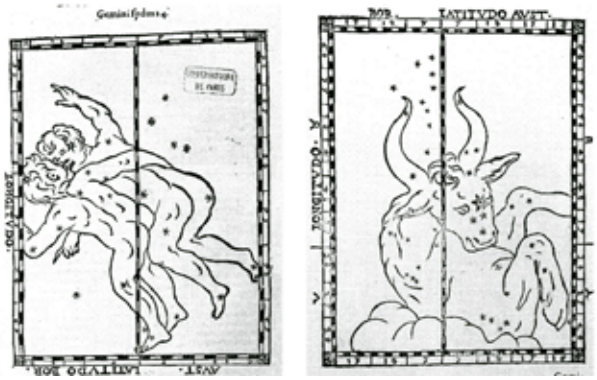


Fig.3. *Les Gémeaux et le Taureau dans l'atlas de Gallucci. Les Gémeaux sont représentés ici de dos (par pudeur ?).*

L'âge d'or

On entend par « âge d'or » des atlas célestes la période qui s'étend du 17e au 18e siècle, période qui vit la parution successive d'atlas extraordinairement somptueux et d'une grande exactitude scientifique. Ces atlas étaient des splendeurs éditoriales et sont toujours recherchés par les bibliophiles (figures page 21).

Johann Bayer (1572-1625) et l'Uranometria

Johann Bayer, né en Allemagne en 1572, publia en 1603 à Augsbourg un atlas céleste en 51 planches intitulé *Uranometria Omnium Asterismorum*. Bayer prit comme base le catalogue de 1 005 étoiles dû à Tycho Brahé auquel il ajouta 1 000 autres étoiles. C'est à Bayer que l'on doit la notation du nom des étoiles par une lettre grecque suivie du nom latin abrégé de la constellation, procédé encore utilisé de nos jours. Cet atlas connut un énorme succès et fut réimprimé de nombreuses fois.

Comme souvent, la publication d'un tel atlas était une source d'inspiration pour d'autres auteurs. C'est ainsi que l'astronome amateur Julius Schiller publia en 1627 un atlas chrétien *Caelum Stellarum Christianum* dans lequel les dénominations mythologiques gréco-romaines étaient remplacées par des dénominations chrétiennes. Cette tentative ne rencontra guère de succès.

Hevelius (1611-1687) et l'*Uranographia, Firmamentum Sobiescianum*

Hevelius, né à Danzig (l'actuelle Gdansk) en 1611, fut le fondateur du célèbre Stellaburgum, meilleur

observatoire européen à son époque. Publié en 1687, l'atlas d'Hevelius comprenait les cartes des deux hémisphères célestes et 54 doubles pages détaillant 73 constellations dans des cartes dessinées en vision externe du globe céleste. Les étoiles ne comportaient aucune dénomination. Les positions des étoiles se fondaient pour la plupart sur les propres mesures d'Hevelius. Les positions de l'hémisphère sud provenaient du catalogue publié par Edmund Halley en 1679.

Flamsteed (1646-1719) et son *Atlas Coelestis*

Né à Denby, Angleterre, en 1646, John Flamsteed commença très jeune à se passionner pour l'astronomie et plus particulièrement pour la détermination de la position des astres. Nommé en 1675 astronome royal par Charles II, il entreprit la rédaction d'un catalogue stellaire (*Historiae Coelestis Britannicae*) en même temps que la réalisation de l'atlas céleste le plus précis de son époque (*Atlas Coelestis*). Les positions des étoiles résultaient des propres observations de Flamsteeed et des catalogues précédents, entre autres de Tycho Brahé et d'Ulugh Beg. Cet atlas fut publié en 1729, après la mort de Flamsteed.

Cet atlas connut plusieurs réimpressions. Il fit grosse impression à l'époque :

• c'était le plus complet et le plus précis jamais publié ;

• il utilisait les coordonnées équatoriales tout en indiquant une grille de coordonnées écliptiques ;

• Flamsteed utilisa une projection particulière dite « projection Sanson-Flamsteed » afin d'atténuer les distorsions des atlas antérieurs.

Son seul défaut était sa taille importante qui le rendait malcommode lors des observations.

Johann Bode (1747-1826) et l'*Uranographia*

Johann Elert Bode naquit à Hambourg en 1747. Auteur prolifique et observateur doué, il devint en 1786 directeur de l'observatoire de l'Académie des Sciences de Berlin. Il a laissé son nom à la fameuse « loi de Bode » aussi appelée « loi de Titius-Bode » qui décrit approximativement les distances relatives des planètes du Système solaire.

Bode publia en 1801 *Uranographia sive Astrorum Descriptio*, détaillant le ciel par des cartes géo-centrées en projection conique. Atlas remarquable de bien des points de vue :

• sa taille, les 20 cartes gravées sont de dimensions imposantes (52,5 cm par 73 cm pour la Grande Ourse) ;

• le nombre d'étoiles, 17 240 étoiles jusqu'à la huitième magnitude.

L'atlas de Bode fut le dernier des grands atlas artistiques. Le développement des observations télescopiques allait mettre un terme aux représentations artistiques dénuées de tout contenu scientifique.

Vers l'astrométrie moderne

Friedrich Argelander (1729-1875) et le *Bonner Durchmusterung*

Il est surprenant qu'il ait fallu attendre jusqu'en 1863 pour voir enfin paraître un atlas qui abandonne les représentations mythologiques souvent nuisibles à la lecture précise des positions stellaires. Argelander publie un catalogue de 362 189 étoiles accompagné d'un atlas. C'en est fini des représentations mythologiques. Ce travail réalisé à partir d'observations visuelles à la lunette méridienne est le dernier grand atlas professionnel. Une nouvelle technique, la photographie, se révèle vite bien supérieure à la carte réalisée à la main.

En 1884, Ernest Mouchez, directeur de l'Observatoire de Paris, présente les photographies de zones de la Voie lactée réalisées par les frères Henry. Le projet international de la Carte du Ciel est lancé en 1887 et est suivi de beaucoup d'autres explorations systématiques du ciel (ce que les Anglo-Saxons appellent « Sky survey »). Ces recensements des objets célestes sont le résultat des progrès de l'optique (télescopes à grand champ de Schmitt) et des détecteurs de lumière (plaques photos de plus en plus sensibles supplantées par les détecteurs électroniques, les CCD). La possibilité d'observer à partir de l'espace décuple aujourd'hui les performances de l'astronomie de position.

Les atlas célestes existent toujours mais ils ne sont plus utilisés que pour des buts pédagogiques ou pour l'observation pratiquée par les amateurs.

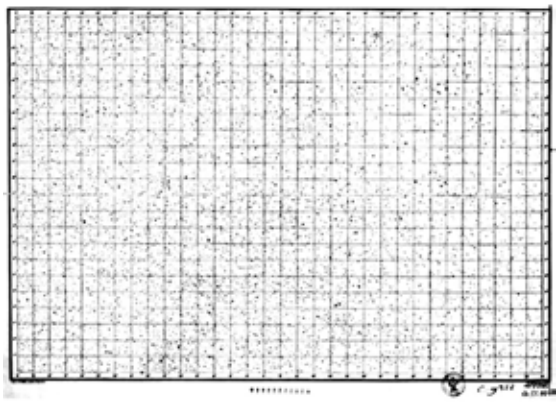
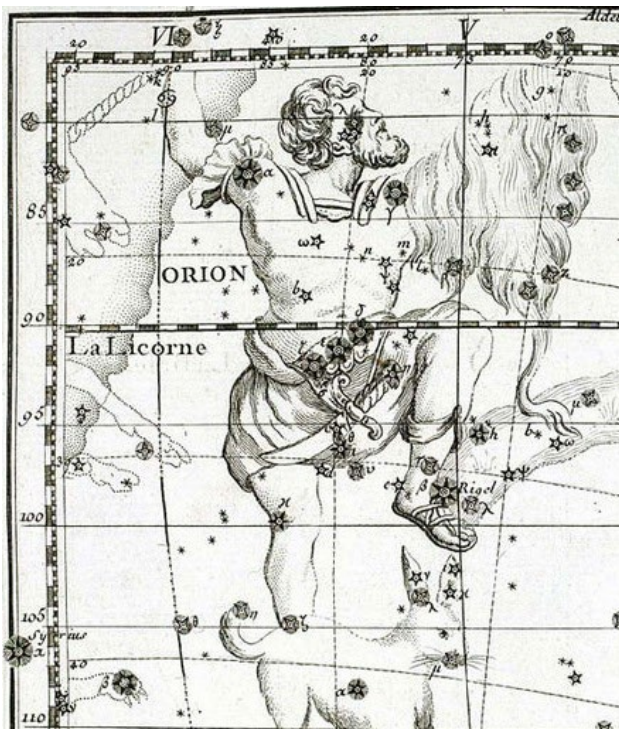


Fig.4. *Carte du Bonner Durchmusterung. On y reconnaît une partie de la constellation du Taureau en haut à droite ainsi que le haut d'Orion sur la gauche avec les trois étoiles du baudrier tout en bas et Bételgeuse et Bellatrix à mi-hauteur.*

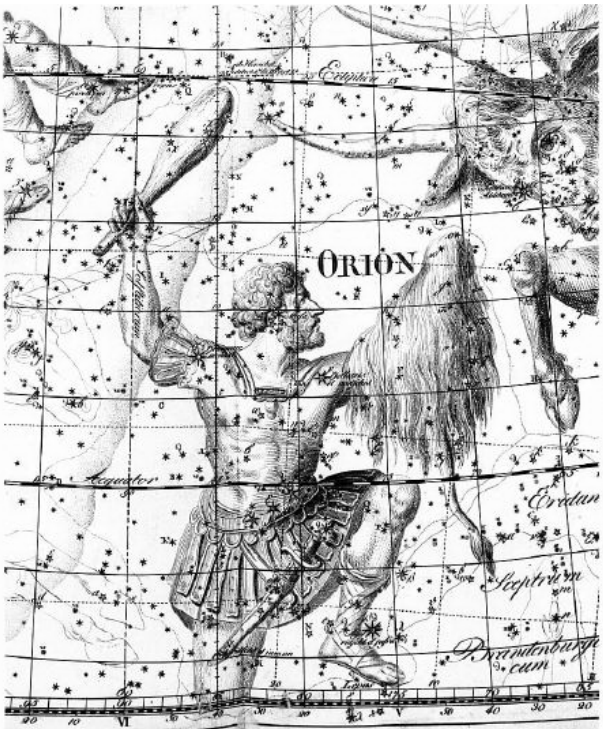
La constellation d'Orion vue par les quatre « grands »

Uranometria de Bayer (1603).

Uranographia d'Hevelius (1687).



Atlas Coelestis de Flamsteed (1729).



Uranographia de Bode (1801).

Chez Hevelius, le ciel est vu de l'extérieur (la Licorne est à droite d'Orion et le Taureau à gauche). Pour les trois autres, il s'agit du ciel vu depuis la Terre, mais avec Orion vu de dos chez Bayer et de face chez Flamsteed et Bode.
Les deux premières cartes montrent une grille de coordonnées écliptiques et la dernière de coordonnées équatoriales. Flamsteed indique les deux grilles de coordonnées.
Quant à la projection utilisée, c'est une projection trapézoïdale chez Bayer et Hévélius, sinusoïdale chez Flamsteed et conique chez Bode. ■

- À lire, le superbe livre Figures du ciel, de Marc Lachièze-Rey et Jean-Pierre Luminet, éditions Seuil/BNF.

Laniakea, l'Univers en trois dimensions

Daniel Pomarède, Institut de Recherche sur les Lois Fondamentales de l'Univers, CEA Université Paris-Saclay
et **Hélène Courtois**, professeure à l'université Claude Bernard Lyon 1

Avec cet article, nous changeons de dimension dans les représentations du ciel. Tout d'abord par les distances ici en jeu puisque nous passons de la proche banlieue de la Galaxie à l'Univers lointain. Mais aussi grâce aux mesures de distances et de vitesses qui nous apportent une autre vision de notre Univers en 3D et de la place que nous y occupons.

La science de la cartographie du Cosmos, appelée « Cosmographie », est une discipline ancienne, intimement liée à la question de la représentation du ciel, qui cherche à répondre à cette question simple : où sommes-nous dans l'Univers ? Notre système planétaire et son étoile le Soleil se situent dans le bras d'Orion, l'un des bras d'une galaxie spirale géante, la Voie lactée, à trente mille années-lumière de son centre. Mais en regardant plus loin, à quelles structures cosmiques appartenons-nous ? Tout autant qu'à la question de notre position dans l'Univers, c'est aussi à la question de notre mouvement dans l'Univers que cette science s'intéresse.

Pour reprendre le cas de la Terre, celle-ci orbite à une vitesse de 30 km/s autour son étoile, qui elle-même est entraînée à une vitesse de 220 km/s dans le mouvement de rotation orbitale du bras d'Orion. Mais à quels mouvements notre galaxie est-elle elle-même soumise ? Et quelles sont les sources de ces mouvements ? Dans cet article, nous présenterons d'importantes avancées qui ont été réalisées ces dernières années sur ces questions, grâce à un programme d'observations, de reconstruction et de visualisation en 3 dimensions reposant sur l'analyse des mouvements des galaxies.

La cosmographie extragalactique

Les galaxies ne sont pas distribuées de manière uniforme dans l'espace, elles constituent des ensembles tels que des groupes de galaxies comprenant seulement quelques membres, des amas de galaxies constituées de milliers de galaxies, ces amas de galaxies s'associant eux-mêmes en superamas de galaxies qui constituent les plus grandes structures connues dans l'Univers. Les observations d'une part et la théorie d'autre part ont montré que la matière, à partir de minuscules fluctuations initiales du champ de densité, s'est organisée suivant une structure appelée la toile cosmique, un réseau où les nœuds sont occupés par les objets les plus denses tels que les amas de galaxies, et sont connectés par des filaments, eux-mêmes séparés par des vides.

On pourrait penser que le travail de cartographie de cette structure serait simple, en utilisant comme traceur de la masse la lumière des galaxies et le décalage spectral comme indicateur de la vitesse de récession des galaxies, et donc de leur distance, à travers la loi de Hubble. Selon cette loi, les galaxies s'éloignent les unes des autres à une vitesse V_{exp} proportionnelle à la distance d qui les séparent : $V_{exp} = H_0\, d$ où $H_0 = 75$ km.s^{-1}·Mpc^{-1} est la constante de Hubble, qui exprime simplement le fait qu'une galaxie distante d'un mégaparsec (3,26 millions d'années-lumière) s'éloigne à la vitesse de 75 kilomètres par seconde. Une cartographie obtenue sur cette base est présentée en figure 1 sous forme d'une projection dans le ciel. On y distingue les éléments fondamentaux de la toile cosmique que sont les amas de galaxies, les filaments et les vides.

Cependant, les difficultés sont nombreuses : la lumière des galaxies ne trace qu'une fraction minoritaire de la matière totale, celle-ci étant constituée pour l'essentiel de la « matière sombre » ou « matière transparente » dont la nature échappe à notre compréhension, tandis que le décalage spectral souffre de distorsions liées par exemple à la dynamique des galaxies au sein des amas dans lesquelles elles orbitent. De plus, une difficulté observationnelle majeure réside dans le fait que nous sommes localisés au sein du plan principal d'une galaxie spirale qui, constituée de centaines de milliards d'étoiles et de vastes et denses nuages de poussière, nous cache une part conséquente du ciel extragalactique. Cette « zone d'obscuration » est particulièrement visible en figure 1 où nous voyons qu'elle coupe la carte en deux, barrant l'Univers en deux régions distinctes, séparées par une région obscurcie, sans données observationnelles.

Comment comprendre alors à quelles structures, groupe, amas, superamas, nœud, filament ou vide de

la toile cosmique nous appartenons ? Une nouvelle branche de la cosmographie, basée sur l'étude des vitesses des galaxies, est venue révolutionner le domaine. Née de la volonté de comprendre la vitesse de notre propre galaxie, elle s'est développée pour nous apporter un nouveau regard sur notre place dans l'Univers.

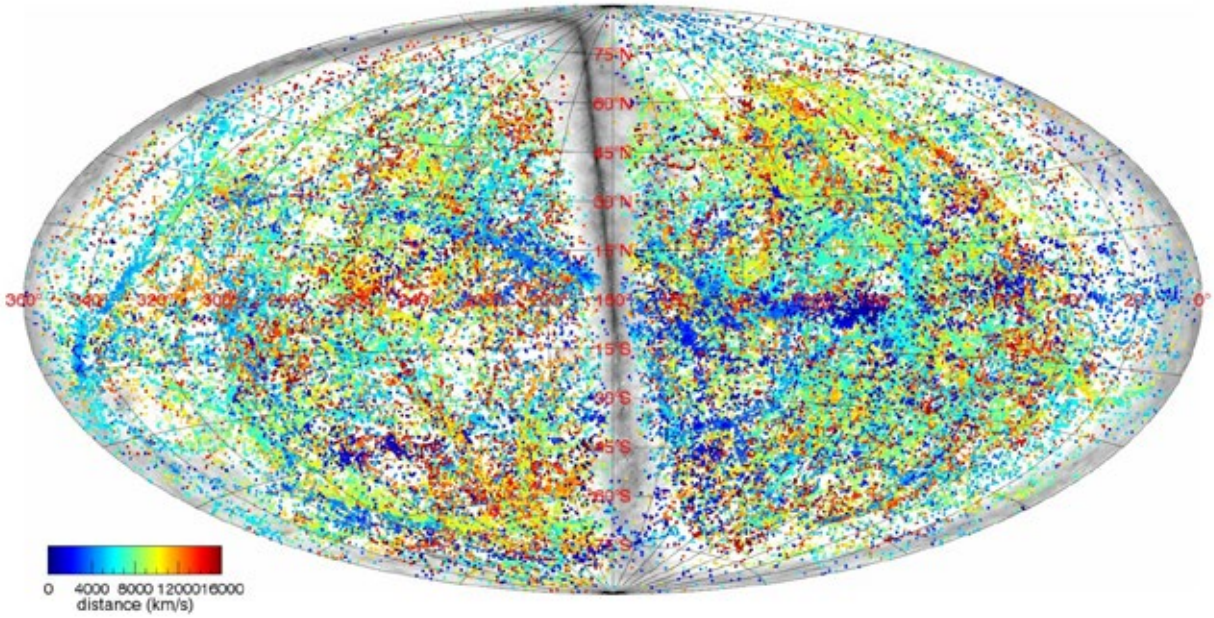


Fig.1. *Projection d'Aïtoff des positions des galaxies. La région grisée correspond à la zone d'obscuration due au disque de notre galaxie. Les positions des galaxies sont indiquées par des marqueurs colorés en fonction de la distance.*

Les vitesses particulières des galaxies et les courants cosmiques

En termes de dynamique, les galaxies sont soumises à deux phénomènes opposés. D'une part l'expansion de l'Univers, décrite par la loi de Hubble présentée plus haut. À cette vitesse de récession héritée du *Big Bang*, s'oppose la gravitation, force d'attraction fondamentale, chaque galaxie subissant la force résultante de l'ensemble des objets qui l'entoure. Si on est capable de mesurer à la fois la distance d'une galaxie et sa vitesse totale V_{tot}, on peut en déduire sa « vitesse particulière » $V_{part} = V_{tot} - H_0 d$. Cette vitesse particulière nous informe sur les forces gravitationnelles en action, et donc sur les structures existantes, éventuellement cachées, par exemple dans la zone d'obscuration galactique, ou invisibles. L'analyse d'ensembles de telles mesures de vitesses particulières permet de cartographier les courants cosmiques, c'est-à-dire les flots de matière en mouvement des régions sous-denses vers les régions sur-denses.

Les estimations des distances des galaxies et de la composante radiale de leurs vitesses particulières sont obtenues avec six méthodologies différentes qui emploient : les caractéristiques des pulsations d'étoiles de type Céphéides, la luminosité des étoiles à l'extrémité de la branche des géantes rouges sur le diagramme de Hertzsprung-Russel, les fluctuations de la brillance de surface d'ensembles d'étoiles dans les galaxies elliptiques, les chandelles standards que constituent les supernovas de type Ia, l'adhérence des galaxies elliptiques à une loi dite du « plan fondamental » qui relie leur luminosité, leur rayon et leur dispersion des vitesses de rotation, et enfin la corrélation entre la luminosité des galaxies spirales et leur vitesse de rotation, appelée « relation de Tully-Fisher ». Le premier catalogue issu de notre programme observationnel est le catalogue *Cosmicflows*-1 publié en 2008, avec 1 791 galaxies situées jusqu'à des distances de l'ordre de 40 Mpc. Le catalogue *Cosmicflows*-2 est constitué de 8 161 galaxies couvrant tout le ciel avec une densité substantielle jusqu'à 100 Mpc, et des distances atteignant ponctuellement 400 Mpc.

La reconstruction du champ de vitesse et de densité à partir des mesures des vitesses particulières est obtenue par la méthodologie bayésienne du filtre de Wiener[1], en supposant en outre que la taille des structures est contrainte par le spectre de puissance obtenu dans le cadre du modèle standard de la cosmologie. Cette reconstruction est fortement contrainte par les données proches, dont la couverture est dense et précise, et se dégrade tout en respectant la contrainte du spectre de puissance vers les grandes distances, où les données se raréfient et présentent de grandes erreurs.

1 Technique de traitement du signal.

Visualisation et cartographie à trois dimensions

La cartographie des courants cosmiques est étudiée à l'aide de méthodes de représentation en trois dimensions qui permettent de visualiser le champ de vitesse produit par le filtre de Wiener, et ses produits dérivés tel que le champ de densité. Le champ de vitesse est représenté le plus souvent par un ensemble de lignes de courants qui, soit atteignent un point de convergence, un attracteur, soit quittent la boîte à l'intérieur de laquelle le champ de vitesse est défini. Le champ de densité est visualisé par différentes techniques telles que le rendu volumique par tracé de rayons ou la visualisation de tranches ; la méthode préférée est celle de la reconstruction d'isosurfaces qui, pour une valeur donnée de la quantité physique considérée, donne les lieux où le champ prend cette valeur en les connectant par un polygone de forme potentiellement complexe. Ces champs reconstruits peuvent être comparés entre eux et à des sources d'informations externes comme des grands catalogues de galaxies qui fournissent des estimations de distance basées sur le décalage spectral des galaxies.

L'univers local

Notre galaxie, la Voie lactée, est une galaxie spirale autour de laquelle gravitent en suivant des orbites quasi circulaires un cortège de galaxies satellites naines telles que le Grand Nuage et le Petit Nuage de Magellan à des distances typiques de 50 kpc. Ensuite l'actrice principale de notre cosmographie proche est la galaxie d'Andromède aux caractéristiques similaires à celle de la Voie lactée. Séparées de 800 kpc, elles constituent un ensemble lié à l'intérieur duquel la gravitation l'emporte sur l'expansion de l'Univers. Avec leurs cortèges de galaxies naines, elles constituent le « Groupe local », dont les galaxies sont destinées à fusionner pour devenir dans quelques milliards d'années une galaxie elliptique géante. Notre groupe de galaxies ainsi que d'autres groupes voisins, tels que le groupe de la galaxie M81 ou celui de la galaxie Centaurus A situés à 4 Mpc, constituent une structure à la forme aplatie appelée « Plaque locale », représentée en figure 2.

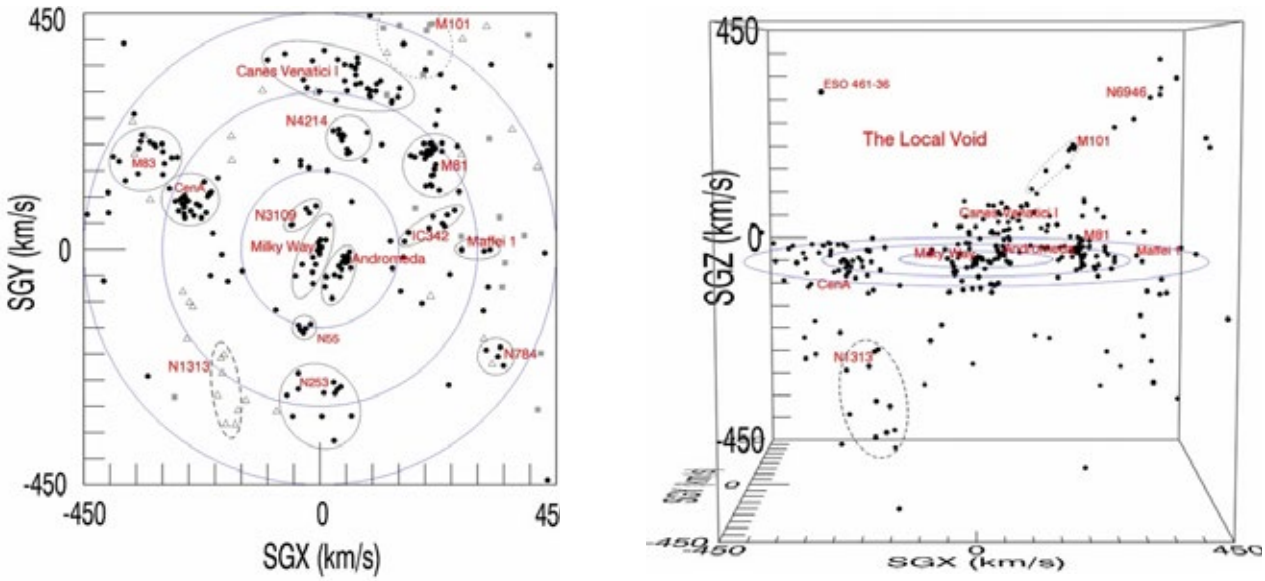
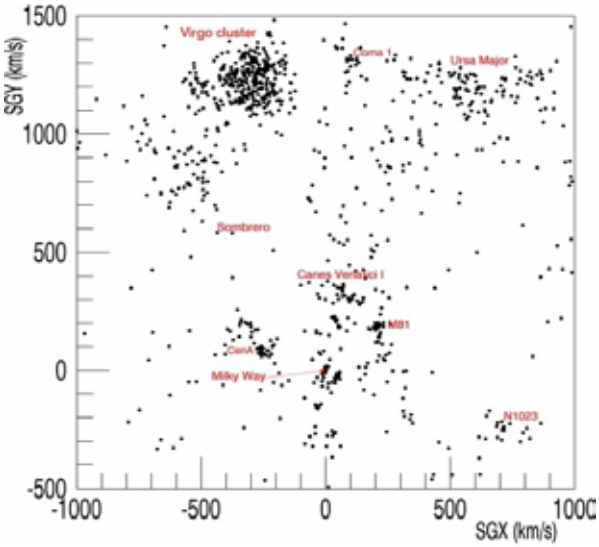


Fig.2. Cartographie de la Plaque locale vue sous deux perspectives différentes : à gauche le plan est vu de face. Chaque point noir marque la position d'une galaxie ; la Voie lactée se trouve à l'origine du système de coordonnées (SGX, SGY, SGZ) = (0, 0, 0). Les cercles concentriques en bleu sont séparés de 2 Mpc. Des groupes de galaxies répertoriés sont entourés par des ellipses, en trait plein, pointillé, et avec des tirets, pour les groupes situés sur le plan SGZ=0, au-dessus, et en dessous, respectivement. À droite, la Plaque locale est vue par la tranche. Cette vue en trois dimensions révèle la présence du « Vide local » qui occupe la partie supérieure du domaine représenté. Ces cartes utilisent le système de coordonnées supergalactiques avec les positions SGX, SGY, SGZ exprimées dans l'espace des vitesses de récession – un retour aux positions en Mpc s'effectuant simplement en divisant pas la constante de Hubble. Le cube a pour dimensions 9 Mpc.

Cette région restreinte de l'Univers est soumise à deux influences locales importantes : l'expulsion du « Vide local », et l'attraction par l'amas de galaxies de la Vierge. Le Vide local, partiellement cartographié en figure 2, est un vide cosmique, c'est-à-dire une région dont la densité est inférieure à la densité moyenne de l'Univers. Les courants cosmiques s'orientant des régions sous-denses vers les régions

sur-denses, la matière se trouve expulsée du vide. La Plaque locale est située en périphérie de ce vide et le délimite, et subit ce phénomène d'expulsion en acquérant une vitesse de 259 km.s^{-1}. L'amas de galaxies dans la constellation de la Vierge est représenté en figure 3. L'attraction gravitationnelle de cet amas est à l'origine d'une composante de 185 km.s^{-1} du mouvement du Groupe local, bien inférieure aux 1 200 km.s^{-1} de sa vitesse de récession. S'il a longtemps été proposé que l'amas de la Vierge soit le cœur d'un « superamas local » ou « superamas de la Vierge » auquel la Voie lactée appartiendrait, il faut noter que La Voie lactée ne tombe donc pas sur l'amas : l'expansion l'emporte à ces échelles.



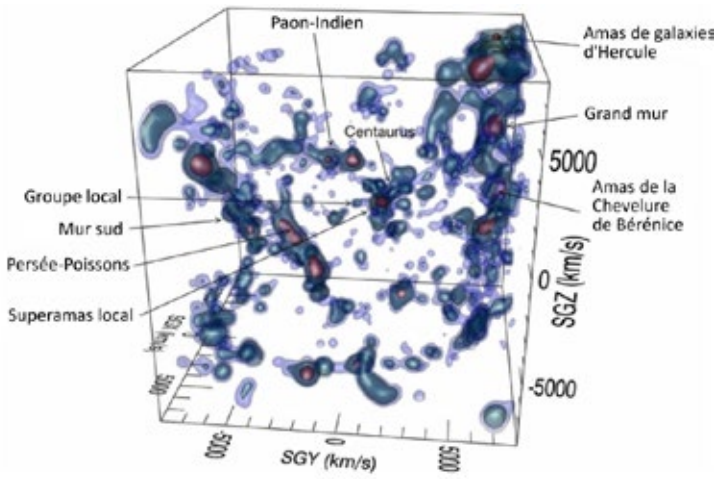


Fig.3. *À gauche, carte du plan de l'équateur supergalactique s'étendant jusqu'à l'amas de la Vierge (Virgo cluster). L'utilisation de coordonnées exprimées dans le système des vitesses de récession permet de connaître la vitesse de récession de chaque galaxie ou ensemble de galaxies ; on voit par exemple que l'amas de la Vierge s'éloigne à environ 1 200 km·s^{-1} en raison de l'expansion de l'Univers. À droite, carte en trois-dimensions de la densité des galaxies dans un cube de dimensions 210 Mpc environ. Le Groupe local se trouve au centre ; les grandes structures sont identifiées, parmi lesquelles le Grand Mur et la Chaîne de Persée-Poisson.*

Continuant à gravir l'échelle de distance, de nouvelles structures apparaissent. En figure 3 (droite) est représentée une carte 3D des grandes structures observées en termes de densité de galaxies par unité de volume. À 45 Mpc, se trouve l'amas du Centaure et plusieurs autres amas de galaxies, qui ensemble constituent une entité appelée le « Grand Attracteur » car responsable d'une part majoritaire de la vitesse de notre galaxie. En figure 4 est représentée une cartographie des courants cosmiques obtenue avec le catalogue de vitesses particulières *Cosmicflows*-1 qui montre la convergence des lignes de courant sur le Grand Attracteur.

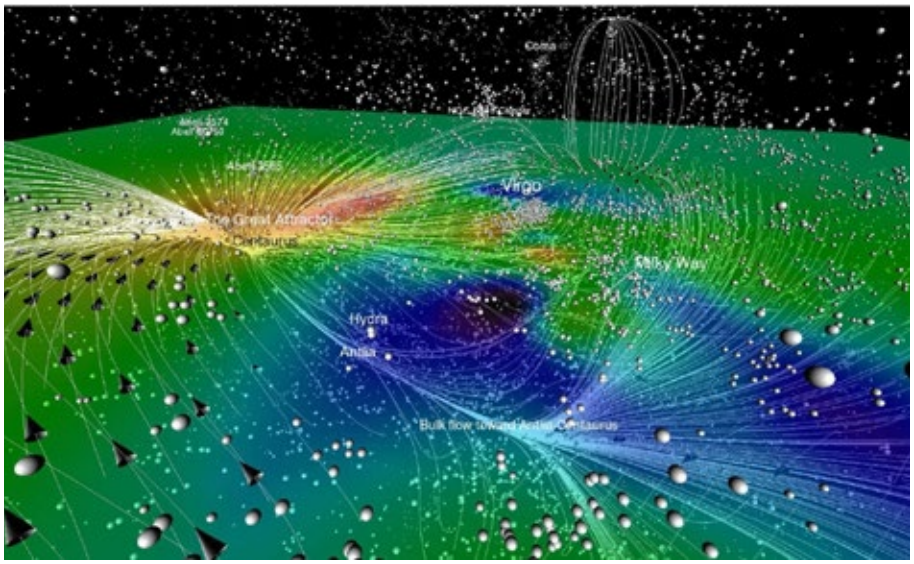


Fig.4. *Carte des courants cosmiques obtenue avec le catalogue Cosmicflows-1. Les sphères blanches marquent les positions des galaxies ; la Voie lactée est indiquée (Milky Way) et l'amas de la Vierge est particulièrement visible. Le plan de l'équateur supergalactique est matérialisé par une image colorée représentant le champ de densité, les couleurs allant du sombre (noir puis bleu) pour les régions sous-denses, passent par le vert pour des densités proches de la valeur moyenne puis atteignent le rouge pour les régions sur-denses. Les lignes de courant permettent de visualiser le champ de vitesse.*

Laniakea, notre superamas de galaxies

La notion de superamas de galaxies a été évoquée pour la première fois en 1958 par Gérard de Vaucouleurs. Un superamas est constitué typiquement de plusieurs amas de galaxies voisins. Des cas représentatifs de superamas qui ont été historiquement discutés sont :

- le Superamas local ou superamas de la Vierge qui englobe l'amas de la Vierge et son entourage ;
- le superamas Hydre-Centaure associé au Grand Attracteur ;
- le superamas d'Hercule, en grande partie visible sur la figure 2 ; situé à 150 Mpc, il comprend 12 amas de galaxies ;
- la concentration de Shapley avec 28 amas de galaxies est un mastodonte situé à 180 Mpc ;
- les structures en filament du Paon-Indien et de Persée-Poisson, visibles en figure 3, sont également considérées comme des superamas, ainsi que la région entourant les amas de la Chevelure de Bérénice et du Lion ;
- le Grand Mur serait un superamas qui engloberait les superamas d'Hercule et de la Chevelure de Bérénice (figure 3).

On le voit, la notion de superamas est vague, à la fois en termes du nombre d'amas contenus (on passe d'un seul amas de galaxies pour le Superamas local, à 28 amas pour Shapley), de dimensions (typiquement 20 Mpc pour le Superamas local et jusqu'à 200 Mpc pour le Grand Mur), de hiérarchies des structures (on a des superamas qui contiennent d'autres superamas), et de topologie (on a des cœurs denses, des filaments, des murs…).

En 2013 est publiée la nouvelle génération de mesures de vitesses particulière *Cosmicflows*-2. La cartographie des courants cosmiques reconstruits à partir de ce catalogue est présentée en figure 5. Dans cette reconstruction, les mesures extérieures à une sphère de 130 Mpc centrée sur le Grand Attracteur ont été filtrées, afin de comprendre la structure locale en éliminant les influences par trop lointaines. Cette cartographie révèle l'existence d'un volume de forme complexe à l'intérieur duquel les courants cosmiques convergent sur un attracteur unique. La figure 5 représente une tranche de ce volume correspondant au plan de l'équateur supergalactique (SGZ=0). Une frontière naturelle se dessine à l'intérieur de laquelle les lignes de courant convergent sur une région proche du Grand Attracteur, et à l'extérieur de laquelle les lignes de courant convergent sur d'autres attracteurs, associés aux structures connues de la Chevelure de Bérénice, de Persée-Poisson et de Shapley. Le volume en trois dimensions à l'intérieur duquel les courants convergent est appelé un « bassin d'attraction ». Cette découverte invite à utiliser cette notion de bassin d'attraction comme définissant un superamas de galaxies. Notre galaxie appartient à ce superamas.

Pour rendre hommage à la tradition des navigateurs et astronomes polynésiens qui utilisaient les étoiles et les courants océaniques pour se guider, notre superamas est appelé *Laniakea*, association des termes hawaïens *Lani*, ciel, et *Akea*, immense. On voit sur la carte de la figure 5 comment la frontière court à travers les vides qui encerclent Laniakea et nous séparent des autres continents extragalactiques voisins tels que Shapley et Persée-Poisson. Une analogie s'offre à nous avec, en géographie, la notion de bassins versants, séparés par des lignes de partage des eaux. La structure en 3D de l'enveloppe de Laniakea est présentée en figure 6 en conjonction avec une reconstruction de la toile cosmique déterminée par les propriétés du champ de vitesse.

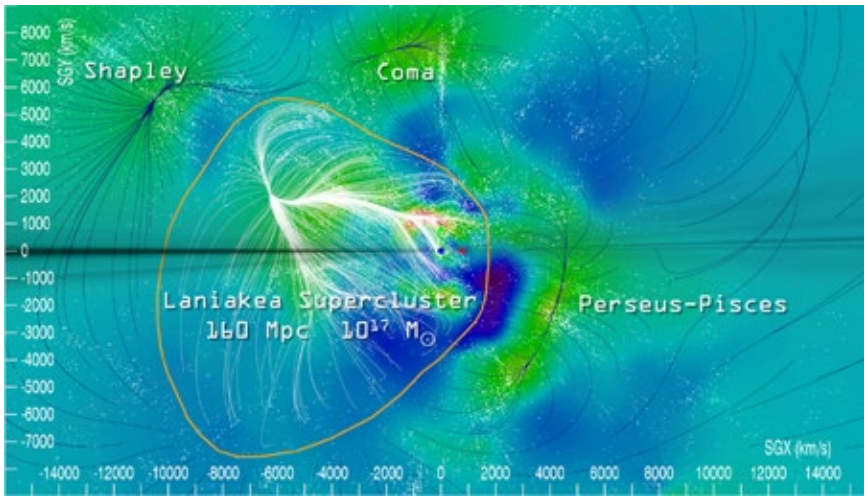


Fig.5. *Cartographie des courants cosmiques obtenue avec le catalogue Cosmicflows-2. La ligne orangée est la frontière du bassin d'attraction correspondant à notre superamas, Laniakea. À l'intérieur de cette frontière, les lignes de courant représentées en blanc convergent sur un attracteur unique, le Grand Attracteur. À l'extérieur de cette frontière les lignes de courant convergent sur des attracteurs associés aux superamas voisins. Le champ de densité est visualisé sur le plan de l'équateur supergalactique (SGZ=0), du noir au bleu pour les régions sous-denses, au vert et rouge pour les régions sur-denses. La zone d'obscuration est représentée en gris.*

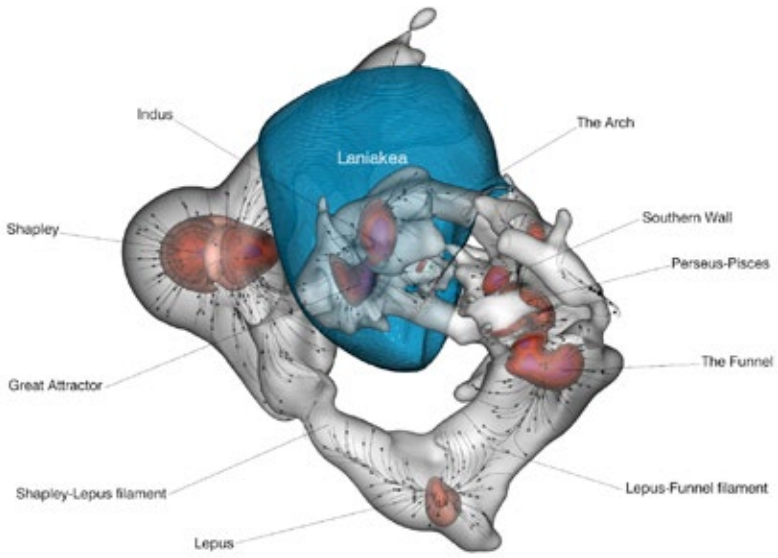


Fig.6. *L'enveloppe du bassin d'attraction de Laniakea, notre superamas de galaxies, est représenté en bleu. Les surfaces grises et rouges représentent les filaments et les nœuds de la toile cosmique. Les lignes de courant du champ de vitesse local sont également visualisées. Les éléments principaux de la cosmographie sont indiqués.*

Pour conclure, revenons maintenant à la représentation du ciel classique obtenue par projection sur la voûte céleste. Sur la figure 1, nous représentions l'ensemble des galaxies : un ensemble complexe face auquel nous étions en peine de dire à quelle structure la Voie lactée appartient. En figure 7, nous représentons uniquement les galaxies qui appartiennent à Laniakea. Nous y reconnaissons une structure caractéristique de la toile cosmique avec plusieurs filaments qui convergent sur un nœud dans la région de l'amas du Centaure, c'est-à-dire du Grand Attracteur. Parmi ces filaments, nous comptons le filament du Paon-Indien qui historiquement était considéré comme un superamas à part entière, mais qui ici n'est plus considéré que comme une structure périphérique le long de laquelle les courants cosmiques courent vers le Grand Attracteur. La cartographie des courants cosmiques de la figure 5 montre également que le problème de la zone d'obscuration est résolu : nous reconstruisons la cosmographie dans cette zone inobservable, en particulier nous cartographions l'entièreté du filament du Paon-Indien qui traverse cette zone pour aboutir au Grand Attracteur. La dimension caractéristique de Laniakea est de 160 Mpc et sa masse est estimée à 10^{17} masses solaires. Notre galaxie, la Voie lactée, se situe dans sa lointaine périphérie, près de la frontière qui sépare Laniakea de son voisin le superamas de Persée-Poisson.

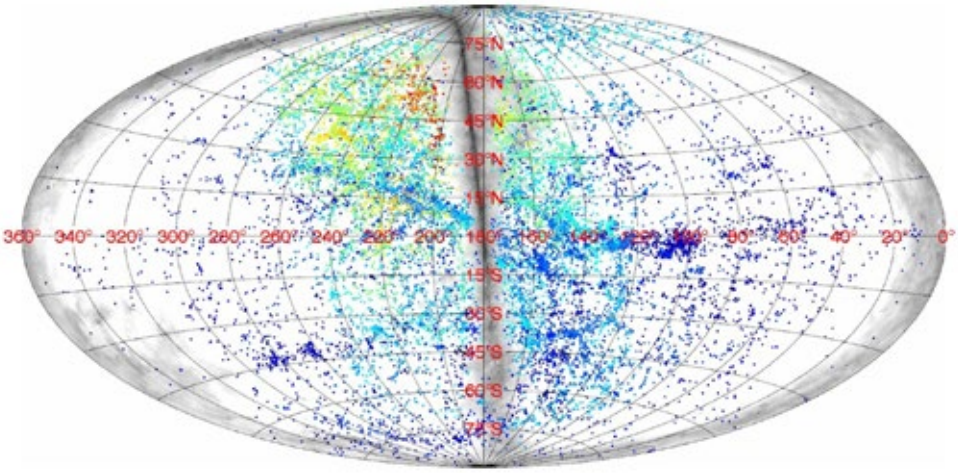
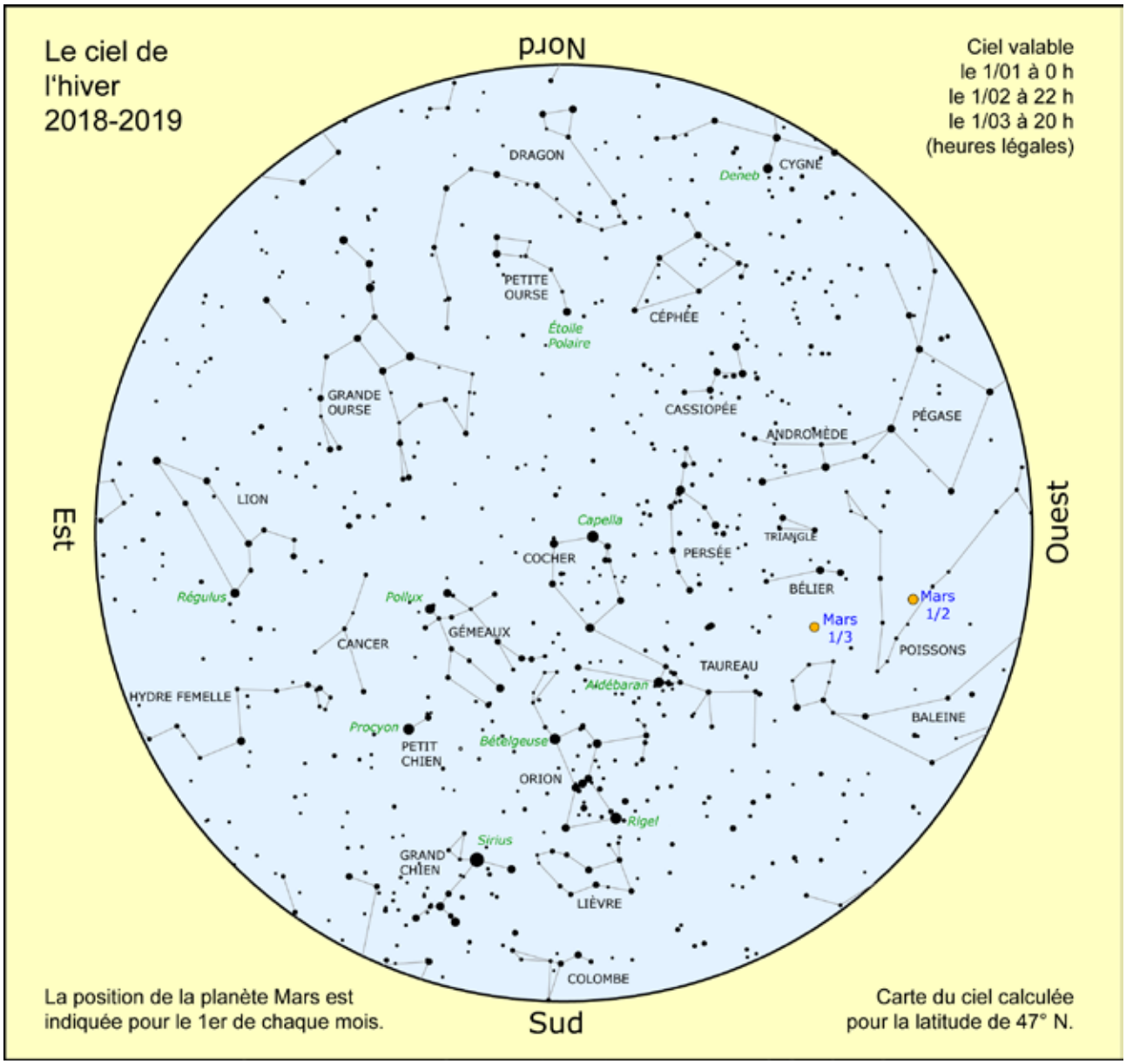


Fig.7. *Projection d'Aïtoff des positions des galaxies appartenant au superamas Laniakea.*

Conclusion

L'étude des courants cosmiques, avec la découverte des frontières de notre superamas de galaxies, bouleverse notre vision de la place que nous occupons dans l'Univers. D'autres résultats importants, concernant en particulier la question de notre vitesse dans l'Univers, ont été obtenus. Les efforts des cosmographes se concentrent maintenant sur l'analyse du catalogue *Cosmicflows*-3 et la préparation de la prochaine génération : *Cosmicflows*-4. Avec ce catalogue, c'est la cosmographie de l'Univers jusqu'à 400 Mpc qui se révélera à nous.

■



Visibilité des planètes

Mercure pourra être recherchée fin décembre le matin au sud-est puis fin février le soir à l'ouest.

Vénus est très lumineuse le matin au sud-est surtout au début de l'hiver. Élongation maximale le 6 janvier.

Mars est toujours observable le soir mais sa distance continue à augmenter et son éclat à diminuer.

Jupiter est aussi une planète du matin, visible dans la constellation d'Ophiucus. À noter son rapprochement avec Vénus du 20 au 25 janvier.

Après son passage derrière le Soleil début janvier, **Saturne** réapparaît dans le ciel du matin en février. Elle sera occultée par la Lune le 2 février. On pourra voir Saturne émerger du disque lunaire dans le ciel de l'aube vers 7 h 30.

Quelques évènements (heures légales)

21/12 : solstice de décembre à 23 h 22 min.
3/01 : périhélie, la Terre passe à 147 099 760 km du Soleil.
4/01 : maximum des Quadrantides (étoiles filantes).
6/01 : éclipse partielle de Soleil (visible au Japon...)
21/01 (matin) : éclipse totale de Lune visible en France à partir de 4 h 34 (entrée dans l'ombre). Voir p. 39.
22/01 (matin) : rapprochement Vénus Jupiter.
2/02 (matin) : occultation de Saturne par la Lune.
18/02 (matin) : rapprochement Vénus Saturne au sud-est.
20/03 : équinoxe de mars à 22 h 58.

Lune

Pleine Lune : les 22/12, 21/01, 19/02.
Nouvelle Lune : les 6/01, 4/02, 6/03.

De la loi de Hubble à la loi de Hubble-Lemaître

Danielle Briot, Observatoire de Paris

L'AG de l'UAI (Union astronomique internationale) qui regroupe plus de 3 000 participants s'est tenue au mois d'août à Vienne. Elle a décidé de renommer la loi de Hubble en y associant le nom de Georges Lemaître. Cet article vous explique pourquoi.

Introduction

Tous les trois ans, à chaque fois dans un pays différent, se tient l'Assemblée générale de l'Union Astronomique Internationale qui réunit environ trois mille astronomes professionnels. En août dernier, l'Assemblée générale a eu lieu à Vienne, en Autriche. Au cours de cette Assemblée générale, sont votées des résolutions, le plus souvent très techniques, qui ne concernent alors que les astronomes qui travaillent dans le secteur concerné. Notons cependant une exception notable : en 2006, au milieu d'un essaim vibrionnant de journalistes, cette Assemblée générale, en réunion à Prague a retiré à Pluton son rang de planète pour le classer dans une catégorie nouvellement définie, les planètes naines. Aujourd'hui, la 4e résolution sur laquelle les astronomes ont eu à se prononcer à Vienne le 31 août dernier nous apparait particulièrement intéressante.

Tous les astronomes connaissent la très célèbre loi de Hubble. Cette loi, nommée à partir de l'astronome Edwin Hubble (1889-1953), exprime que les galaxies dans l'Univers s'éloignent les unes des autres à une vitesse relative proportionnelle à leur distance. C'est la fameuse loi dite d'expansion de l'Univers qui est assurément l'une des plus importantes de l'astronomie. Or, il a été proposé que la loi de Hubble s'appelle désormais la loi de Hubble-Lemaître.

Qui était Hubble ?

Edwin Hubble (1889-1953) est un astronome américain. Il étudie les mathématiques et l'astronomie à Chicago puis le droit à Oxford, en Angleterre. Après la première guerre mondiale, il a travaillé à l'observatoire du mont Wilson en Californie, où il eut la possibilité d'observer avec le télescope Hooker de 2,54 m qui était alors le plus grand du monde. Par la suite, Hubble fut le premier astronome à observer au télescope de 5 m du Palomar, qui fut à son tour le plus grand du monde à sa mise en service en 1949 et le demeura jusqu'à 1975.

Comme cela est détaillé plus bas, il démontre que les *nébuleuses spirales* sont situées en dehors de la Voie lactée. En 1926, il définit une classification des galaxies, la classification dite en diapason. Les travaux de Hubble au sujet de l'expansion de l'Univers forment le sujet principal du présent article. Son nom a été donné au télescope spatial de la Nasa et de l'Esa, lancé en 1990.

Notons que certains historiens estiment que la vie et l'œuvre de Hubble ont été quelque peu embellies par ses soins et les soins de sa veuve.

Qui était Lemaître ?

Georges Lemaître (1894-1966) est un scientifique belge. Il commence des études d'ingénieur qu'il interrompt pour s'engager dans l'armée lors de la première guerre mondiale.

Après la guerre il entreprend des études de sciences physiques et mathématiques ainsi que des études de théologie, ceci afin de pouvoir être ordonné prêtre. En 1923, il obtient une bourse pour aller étudier à l'étranger. Il passe un an à Cambridge en Angleterre, sous la direction d'Arthur Eddington (1882-1944) qui travaillait sur la théorie de la relativité d'Einstein. L'année suivante il travaille à Cambridge (États-Unis) au Harvard College Observatory, avec Harlow Shapley (1885-1972), puis au Massachusetts Institute of Technology (MIT).

Il revient en Europe en 1925 d'où il soumet sa thèse par écrit au MIT. Il est en 1927 nommé professeur à l'Université Catholique de Louvain, poste qu'il occupera jusqu'à sa retraite en 1964, et la même année il publie son article fondamental sur l'expansion de l'Univers, article qui le classe parmi les cosmologistes les plus importants.

Ce qui était connu et ce qui a été découvert

Le mot nébuleuse, qui vient du mot latin nébula qui signifie nuage, s'appliquait depuis longtemps aux astres qui ne sont pas ponctuels comme le sont les étoiles, mais qui ne doivent pas être confondus avec des comètes car ils sont fixes dans le ciel. Au fur et à mesure que les instruments d'observation devenaient de plus en plus puissants et précis, il devenait évident que les nébuleuses pouvaient être très différentes les unes des autres et correspondre à des objets célestes très différents. Depuis 1912 Vesto Slipher (1875-1969) commence à mesurer les vitesses radiales de nébuleuses spirales, d'autres nébuleuses et d'amas globulaires. Les vitesses radiales, vitesses auxquelles les astres s'éloignent ou se rapprochent de nous sont déterminées à partir du décalage des raies sur les spectres de ces astres (effet Doppler). Avec les instruments de l'époque, ces observations étaient très délicates et nécessitaient de très longs temps de pose. Les premiers résultats présentés en 1914 montrent que les nébuleuses spirales ont de très grandes vitesses radiales et que la plupart d'entre elles ont des vitesses radiales de récession, c'est-à-dire qu'elles s'éloignent du Système solaire. Sur 41 nébuleuses spirales alors observées, 36 s'éloignent de nous.

Les questions sur la nature de certaines de ces nébuleuses, les nébuleuses spirales, se posaient depuis longtemps. Ces nébuleuses sont-elles hors de notre Voie lactée et analogues à celle-ci ou bien, situées dans notre galaxie, sont-elles des systèmes planétaires en formation comme le suggère leur forme de disque ? Cette question n'est pas nouvelle puisque dès 1755 Emmanuel Kant (1724-1804) parle d'univers-îles au sujet de ces astres et considère qu'ils sont très lointains, et bien extérieurs à la Voie lactée. Durant les premières décennies du vingtième siècle, les avis des astronomes sur ce sujet étaient très partagés, et tous avaient bien conscience que c'était un problème fondamental. En 1920 le « grand débat » est organisé entre deux astronomes américains, Harlow Shapley (1885-1972), partisan d'un Univers se limitant à la Voie lactée, et Herber Curtis (1872-1942), estimant que la nébuleuse d'Andromède est extérieure à la Voie lactée. Ce débat ne permet pas d'aboutir à une conclusion. La précision des observations que l'on pouvait alors obtenir était insuffisante. À partir de 1924 et grâce au nouveau télescope Hooker du Mont Wilson mis à sa disposition, Hubble observe des céphéides dans la nébuleuse irrégulière NGC 6822, dans Messier 33, (la nébuleuse du Triangle), et enfin dans Messier 31 (la nébuleuse d'Andromède). Les céphéides sont des étoiles variables périodiques nommées ainsi parce que les variations qu'elles montrent sont analogues à celles de l'étoile δ Céphée. Or l'observation de telles étoiles a impliqué de formidables conséquences pour notre connaissance de l'Univers. En effet, en étudiant des céphéides dans le Petit Nuage de Magellan, donc toutes situées approximativement à la même distance, Henrietta Leavitt (1868-1921) avait découvert en 1912 que la période de variation de ces étoiles

était proportionnelle à leur luminosité. Sachant que l'affaiblissement de la lumière d'un objet lointain est proportionnel au carré de sa distance, et que bien sûr la distance d'un astre ne modifie pas sa période, on obtenait ainsi des *chandelles cosmiques* qui pouvaient permettre d'étalonner l'Univers. À partir des céphéides qu'il observe dans des nébuleuses, Hubble estime leur distance et découvre que ces nébuleuses, en particulier les nébuleuses spirales, sont en dehors de notre Voie lactée. Les nébuleuses spirales sont donc des *nébuleuses extra-galactiques* (on a ensuite utilisé l'expression *galaxies extérieures* et maintenant on emploie simplement le mot *galaxie*, le mot *Galaxie* avec une majuscule étant réservé à notre Voie lactée). Le décalage vers le rouge observé dans les spectres de la plupart des *nébuleuses extragalactiques* devient donc un point important dont il faut tenir compte dans la description de l'Univers.

Travaux et articles de Lemaître et de Hubble sur l'expansion de l'Univers

En 1927, Georges Lemaître publie un article intitulé « *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques* », en **français,** dans les *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, revue relativement peu diffusée, en particulier aux États-Unis d'Amérique. Dans cet article Lemaître revoit les deux solutions proposées alors, et dont aucune n'était satisfaisante. La première solution est celle proposée par le néerlandais Willem de Sitter (1872-1934) qui invente en 1917 le concept d'Univers en expansion, ce qui correspond au fait que les nébuleuses extragalactiques semblent nous fuir. Cette solution respecte les équations de la relativité générale alors toute récente d'Albert Einstein (1879-1955) mais ignore la présence de la matière. Or, comme nous le savons tous, l'Univers n'est pas vide. La deuxième solution est celle d'Einstein lui-même, proposée la même année, qui prévoit une densité de matière non nulle mais qui ne correspond pas aux récentes observations, en particulier parce qu'il s'agit d'un Univers statique. Dans son article, Lemaître explique ainsi ce qui est quelquefois appelé la fuite des galaxies, due au décalage vers le rouge (redshift) : « *L'éloignement des nébuleuses extra-galactiques est un effet cosmique dû à l'expansion de l'espace* ». Ce ne sont pas les galaxies qui s'éloignent les unes des autres avec une vitesse proportionnelle à leur distance, c'est l'espace qui est en expansion. On voit dans cet article que Lemaître avait une vision tout à fait novatrice et pertinente de l'explication physique du décalage vers le rouge des spectres des galaxies.

En 1927, se tient à Bruxelles le cinquième congrès Solvay de physique, probablement le plus fameux de tous les congrès Solvay. Plus de la moitié des participants étaient des prix Nobel ou allaient le devenir. Lemaître eut l'occasion de discuter avec Einstein dont un ami lui avait fait lire son article. Lemaître parle ainsi de cette entrevue : « Après quelques remarques techniques favorables, il conclut en disant que du point de vue physique cela lui paraissait tout à fait abominable ». Même un physicien comme Einstein n'était alors pas prêt à accueillir l'idée de l'Univers en expansion !

En 1928, se tient à Leyde aux Pays-Bas, la troisième Assemblée générale de l'Union Astronomique Internationale (UAI). Hubble, depuis 1922, et Lemaître, depuis 1925, sont tous deux membres de l'UAI et on sait qu'ils se rencontrent à cette occasion. Ils discutent de ce qu'impliquent pour le récent modèle de l'Univers en expansion, les données d'observation du décalage vers le rouge des nébuleuses extragalactiques.

En 1929, Hubble publie un article intitulé « *A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae* », soit « *Une Relation entre la Distance et la Vitesse Radiale pour les Nébuleuses Extra-Galactiques* ». Cet article est publié dans l'*Astrophysical Journal* qui est l'un des plus connus, si ce n'est le plus connu, des journaux d'astrophysique. Depuis l'article de Lemaître publié deux ans auparavant, de nouvelles données d'observations sur les nébuleuses extragalactiques ont été obtenues qui figurent dans ce nouvel article. À partir de cet article, le principe de l'expansion cosmique est connu comme la loi de Hubble.

Lemaître avait envoyé son article à l'astrophysicien britannique Eddington qui avait été son professeur, mais Eddington avait négligé de le lire. En 1930, Eddington, considérant que ni l'Univers statique d'Einstein, ni l'Univers vide de de Sitter ne sont des modèles satisfaisants, publie une note dans laquelle il demande que l'on étudie des solutions intermédiaires. Lemaître lui écrit pour lui rappeler son article de 1927 qui justement donnait la solution recherchée. Eddington fera tout alors pour que cet article soit connu. Les *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS)*, qui comptent parmi les plus importantes revues pour la publication des résultats d'astronomie, demandent une traduction à Lemaître de son article. Cette traduction paraît en 1931 sous le titre « *A homogeous Universe of*

Constant Mass and Increasing Radius accounting for the Radial Velocity of Extra-galactic Nebulæ ». Cependant, certains passages de l'article original en français ont disparu dans la traduction anglaise, à savoir, le paragraphe dans lequel Lemaître dérivait le taux d'expansion de l'Univers et une note sur les erreurs sur les estimations des distances des galaxies. Dans un des passages absents dans la traduction anglaise, Lemaître calcule deux valeurs possibles pour la quantité qui allait devenir la constante de Hubble. L'absence de ces passages est d'abord passée inaperçue. On s'est demandé ensuite qui avait traduit l'article et pourquoi ces passages avaient été supprimés. *Traduttore, traditore ?* Le traducteur est-il un traitre ? Cependant, des recherches sur des documents originaux ont montré que Lemaître a traduit lui-même son article. Alors pourquoi a-t-il supprimé certains des passages importants ? On a parlé de sa modestie. En fait, les parties supprimées portaient sur un échantillon de galaxies qui était disponible lorsque Lemaître avait écrit son article original, mais qui était plus petit que celui qu'Hubble avait eu à sa disposition pour son article qui était postérieur de deux ans. Lemaître n'a pas voulu citer l'échantillon de galaxies utilisé quand il avait écrit son article en français qui était « dépassé » lors de la traduction de son article en anglais.

Le rôle très important joué par Lemaître dans l'établissement de la théorie sur la fuite des galaxies dans un Univers en expansion, théorie qui est à la base de la cosmologie moderne est maintenant évident.

Dans ses publications suivantes, et toujours dans le cadre de l'hypothèse d'un Univers en expansion, Lemaître s'est attaché à étudier l'instant origine de l'Univers. Il développera pour cela la théorie de l'atome primitif.

Cependant, pendant plusieurs décennies, il a existé plusieurs théories cosmologiques totalement différentes. Certains astronomes, et en particulier l'astronome anglais Fred Hoyle (1915-2001) étaient partisans de la théorie d'un Univers stationnaire, sans commencement ni fin, avec une création continue de matière pour compenser la décroissance de la densité entraînée par l'expansion de l'espace. Ainsi Hoyle a par dérision, en 1949, qualifié de *Big Bang* autrement dit *Grand Boum*, l'origine de l'Univers, afin de ridiculiser la théorie à laquelle il ne croyait pas. Le rayonnement du fond de l'Univers, plus précisément le rayonnement du fond diffus cosmologique à 2,7 K a définitivement établi l'existence d'un moment origine. Le mot Big Bang qui voulait être ironique et moqueur est devenu un terme scientifique qualifiant l'une des théories scientifiques les plus importantes.

La loi de Hubble-Lemaître

Le rôle de Georges Lemaître dans l'établissement de la loi sur l'expansion de l'Univers étant maintenant parfaitement établi, l'Union Astronomique Internationale, comme nous l'avons vu plus haut, propose au cours de l'Assemblée générale de 2018 une résolution pour que la loi de Hubble soit désormais appelée la loi de Hubble-Lemaître.

Quelques remarques ont suggéré que c'était ouvrir la porte à de nombreuses modifications analogues, et d'autres que la formulation loi de Lemaître-Hubble serait plus logique. À cette dernière suggestion, il a été répondu, sans convaincre l'auditoire, que la formulation loi de Hubble-Lemaître était plus harmonieuse d'un point de vue phonétique. Un pré-vote a eu lieu à mains levées au cours duquel la résolution a été approuvée à la majorité de 74 %. Afin qu'un plus grand nombre de membres de l'UAI puissent s'exprimer, un vote électronique a été organisé dans les semaines qui ont suivi. La recommandation de l'Union Astronomique Internationale d'appeler loi de Hubble-Lemaître la loi d'expansion de l'Univers a été votée par 3 169 astronomes, ce qui correspond à une majorité de 78 % des votants.

On peut maintenant se demander en quelles autres circonstances a pu être oublié le rôle que certains scientifiques ont joué dans des découvertes fondamentales ou dans l'obtention de résultats importants. Rappelons par exemple qu'il a parfois été demandé que le diagramme des céphéides qui montre le rapport entre la luminosité des céphéides et leur période, que l'on appelle généralement le diagramme période-luminosité des céphéides soit appelé diagramme de Leavitt pour rendre hommage à Henrietta Leavitt dont la découverte a eu tant de conséquences importantes pour notre connaissance de l'Univers.

■

Brève bibliographie :

« L'invention du Big Bang », Jean-Pierre Luminet éditions du Seuil, collection Science, nouvelle édition de 2014.

« L'affaire Hubble-Lemaître résolue », Dominique Lambert, Pour la Science, n° 412, Février 2012.

AVEC NOS ÉLÈVES

Les Pléiades vues par Gaia

Sylvie Thiault, Lyon

Comment utiliser les milliards de données du satellite Gaia avec des élèves ? Cet article nous en propose un exemple en étudiant l'amas des Pléiades et son évolution. Vous pourrez ensuite en chercher d'autres.

À l'école d'été 2016, nous avions eu l'honneur d'accueillir François Mignard, directeur de recherche émérite au CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur (OCA). Il nous avait alors présenté les objectifs et les enjeux de la mission GAIA. La conférence est à visionner sur le site du CLEA[1]. Depuis, l'équipe de GAIA a publié les résultats de mesures concernant des milliards d'étoiles. Le dernier catalogue a été publié le 25 avril 2018. Les données traitées sont disponibles et vous trouverez ici une première piste d'utilisation. Cette activité a été testée dans un atelier du mercredi de l'observatoire de Lyon ainsi qu'à l'école d'été 2018 du CLEA. Nous nous sommes intéressés à l'amas des Pléiades. Nous proposons d'en faire une carte et d'observer le mouvement propre des étoiles principales. Nous pensons qu'un travail à partir des catalogues utilisés par les professionnels est motivant.

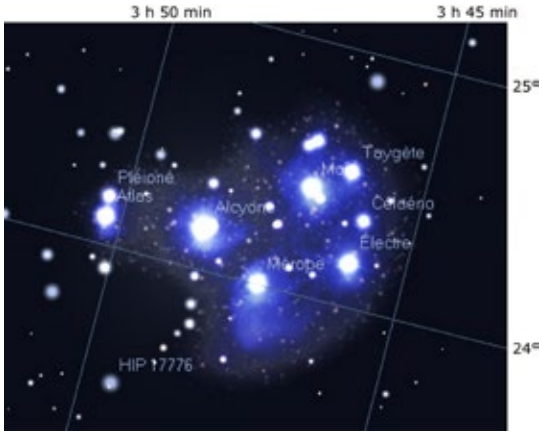


Fig.1. *Les Pléiades sur Stellarium.*

L'amas des Pléiades est un amas ouvert de plus de 1 000 étoiles de la constellation du Taureau, bien visible dans le ciel des nuits d'hiver. Les 7 étoiles les plus brillantes sont « les sept sœurs », filles d'Atlas et de Pléione : Astérope, Mérope, Électre, Maïa, Taygète, Célaéno et Alcyone. À l'aide du logiciel Stellarium[2] on détermine la zone du ciel dans laquelle se trouve l'amas des Pléiades.

On discute du choix du système de coordonnées le plus adapté à notre objet d'étude : le système de coordonnées équatoriales. On se limitera en ascension droite entre 3 h 30 min et 4 h 00 min et en déclinaison entre 23° 30' et 25° 00' (voir figure 1).

Recherche et récupération des données dans le catalogue Gaia

Les données publiées par le consortium GAIA sont accessibles par le catalogue ViZieR du Centre de données astronomiques de Strasbourg[3].

Sélectionner GAIA DR2 (il s'agit de la dernière mise à jour du 25 avril 2018), puis I/345/gaia2.

Décocher tout (à gauche, sous préférences, cocher puis décocher « All columns »).

Puis sélectionner seulement :

- Ascension droite en degré : RA_ICRS[4] ;
- Déclinaison en degré : DE_ICRS ;
- Parallaxe : Plx ;
- Mouvement propre en ascension droite : pmRA[5]
- Mouvement propre en déclinaison : pmDE ;
- Magnitude apparente : Gmag ;
- Vitesse radiale : RV ;
- Température effective : Teff.

On a fait ici un choix réduit de données. Il sera toujours possible de pousser plus loin, en particulier en tenant compte des erreurs de mesures.

Dans la colonne « constraint » saisir les plages d'ascension droite et de déclinaison (on peut voir la syntaxe en cliquant sur Constraints). On rentre directement la plage d'ascension droite en h min s. De même qu'on rentre directement la déclinaison en degré sexagésimal :

- à droite de RA_ICRS, on tape : 3 30..4 00
- à droite de DE_ICRS, on tape : +23 30..+25 00

1 http://clea-astro.eu/conferences/distances-dans-la-galaxie
2 Pour la prise en main de Stellarium, voir CC160 (2017). Pour les coordonnées, voir CC155 (2016).
3 http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR
4 ICRS est un référentiel international.
5 Proper motion in right ascension.

Full	RA_ICRS deg	DE_ICRS deg	Plx mas	pmRA mas/yr	pmDE mas/yr	Gmag mag	RV km/s	Teff K
1	056.58166915529	+23.94815019485	9.4781	15.378	-49.907	4.0908		9145.33
2	056.21900085855	+24.11313909272	8.7041	22.670	-50.383	3.6412		9329.67
3	056.45679251747	+24.36754753359	9.4780	19.339	-44.550	3.8071		9334.50
4	056.20098931653	+24.28927388310	7.5234	19.665	-45.671	5.4267		9644.00
5	056.30215999021	+24.46706984862	8.9691	17.783	-50.263	4.2370		9164.00
6	059.35989958451	+24.46190309346	2.7117	-5.261	-7.778	5.7395	-11.99	4376.76
7	057.43146561674	+23.71165592051	7.4962	18.016	-45.801	6.1453		9438.00
8	057.23748423401	+23.85688255687	11.5725	48.102	-57.978	6.3691	11.01	6811.50
9	057.29068442010	+24.05321807966	8.4292	21.761	-46.241	3.5312		8060.00
10	057.29682771146	+24.13650490691	7.7229	18.638	-48.678	5.1857		9438.00
11	056.87124720787	+24.10494049997	7.9688	25.343	-45.938	2.7730		6706.75
12	056.83775691923	+24.11607367697	7.4450	20.802	-45.044	6.2838		9500.00
13	056.51217735556	+24.52770350702	7.3453	19.599	-45.077	6.4090		9654.00
14	056.47708147249	+24.55431170085	7.5658	20.062	-46.432	5.7392		9622.67
15	057.02711100360	+24.98829364374	3.6378	-28.924	-28.552	5.5737	-56.54	3907.23
16	056.29067985628	+24.83906338093	7.3405	20.744	-46.538	5.6231		8383.25

On limite la magnitude apparente des étoiles à la magnitude des étoiles visibles à l'œil nu :

- à droite de Gmag, on tape : <= 6.5.

Puis on clique sur « Submit ». On doit obtenir le tableau ci-dessus.

Observez le tableau obtenu. Les coordonnées des étoiles recensées sont en degrés décimaux. Observez bien également les unités des autres données. Nous en aurons besoin plus loin.

Pour trois des 16 étoiles dont on a récupéré les données, les parallaxes sont très différentes des 13 autres... Elles sont donc à des distances très différentes des autres étoiles recensées. De plus, ces trois étoiles ont une température effective beaucoup plus basse que les autres. Ces étoiles ne font pas partie de l'amas.

Par la suite, nous les éliminerons de notre traitement. Nous n'aurons donc aucune information de vitesse radiale et nous devrons nous contenter des mouvements propres tangentiels.

En cliquant sur StartAladinLite, on obtient une photographie du champ où les étoiles recensées dans le tableau sont repérées par un petit carré rouge. Fermer AladinLite.

On récupère les données pour les traiter avec nos logiciels habituels, tableur puis GeoGebra.

En haut et à gauche de l'écran, on clique sur « Save in CDS Portal » puis « Save » .

On obtient le message « The file has been successfully loaded », on clique alors sur : GoTo MyData.

À la rubrique Download (à droite), sélectionner « CSV ».

Ouvrir avec un tableur Excel ou LibreOffice (options de séparateur : tabulation et virgule).

Traitement des données

On recopie le tableau obtenu dans le tableur de GeoGebra à partir de B2[6].

Supprimer les trois étoiles « hors norme », par clic droit « effacer la ligne ».

En ligne 1 on indiquera les unités.

En colonne A, on pourra noter les noms des étoiles, quand on les aura reconnues... à défaut on les numérote !

On peut supprimer la colonne H des vitesses radiales : elle est vide !

On peut, en colonne I, calculer les distances en parsecs et en colonne J les distances en al.

Rappel sur les distances

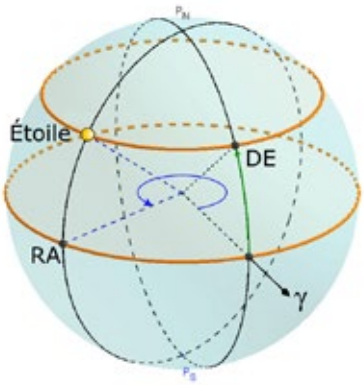
La parallaxe d'un astre est l'angle sous lequel on voit le demi grand axe moyen de l'orbite terrestre depuis cet astre.
Distance en parsec (pc) = $1/\pi$, avec π, la parallaxe exprimée en seconde d'arc.
Conversion en année-lumière :
1 pc = 3,26156 al.

Une carte des Pléiades

Dans la fenêtre graphique, on va construire les positions des étoiles en projection quadratique sur le

6 Pour l'utilisation de GeoGebra, on pourra se reporter à https:// cral.univ-lyon1.fr/labo/fc/astrogebra/elements_geogebra.pdf

plan de la feuille : ascension droite en abscisse et déclinaison en ordonnée [7].



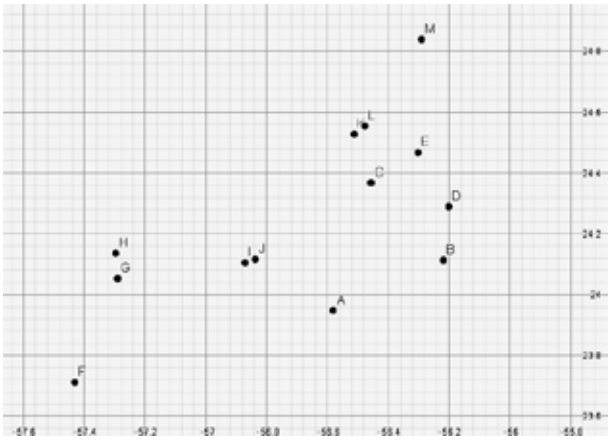
Problème : les ascensions droites sont croissantes de droite à gauche. On ajoutera un signe «–» dans le calcul de l'abscisse.

En colonne K et L , taper :

- en K1 : « abscisse sur la carte » ;
- en L1 : « ordonnée sur la carte ».

Taper en K3 : « = –B3 »
et en L3 : « = C3 ».
Copier jusqu'en bas du tableau.
Sélectionner toutes ces coordonnées et avec clic droit créer une liste de points.

Il faut ajuster la fenêtre par un « zoom arrière » pour que les points apparaissent puis re-zoomer « zoom avant » pour bien les séparer. Vous devez obtenir la configuration ci-dessous.



Évolution dans le temps

On crée un curseur « temps », en tapant t=0 dans la fenêtre de saisie.

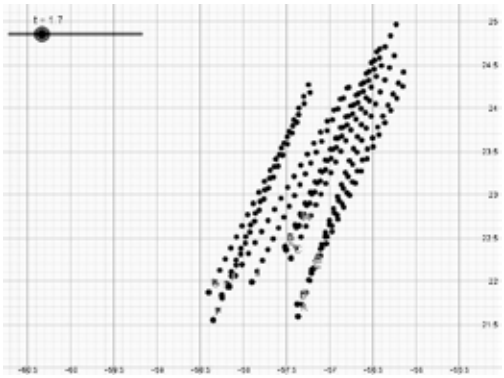
On prendra 100 000 ans comme unité de temps.

Faire apparaître le curseur temps dans la fenêtre graphique et par clic droit (propriétés), régler le curseur :

Min = -1 , Max = 10 et incrément de 0.1.

7 Pour la projection quadratique, voir page 9.

Pour le mouvement propre en ascension droite, il faut préciser un point délicat :
On appelle μ_α la variation d'ascension droite en mas par an. On note $\mu_{\alpha*} = \mu_\alpha \times \cos(\delta)$. Les catalogues comme Gaia fournissent la valeur de $\mu_{\alpha*}$ et non de μ_α. Il faudra donc diviser la valeur donnée par Gaia par cos(δ) pour retrouver la variation d'ascension droite.
On va faire l'hypothèse que les mouvements propres en ascension droite et en déclinaison sont uniformes au cours du temps[8].
Rappel : 1as = 1/3 600°, 1mas = 1/3 600 000°.
Les mouvements propres (E3 et F3) sont en mas/an.
De plus, on a fixé l'unité de temps à 100 000 ans, donc la variation en déclinaison vaut :
t/100 000 × pmDE × 3 600 000 soit t × pmDE / 36.
De même que la variation en ascension vaut :
t × pmRA / 36.
Donc en colonne K et L, on tape :
en K3 : « = -(B3+ t*E3/36/cos(L3°) » Attention au ° des degrés !
et en L3 : « = C3+t*F3/36 ».
Copier jusqu'en bas du tableau.
Sélectionner tous les points et afficher « trace » (clic droit). Animer le curseur. Observez !



Prolongements possibles

En s'aidant de Stellarium, identifier les étoiles du champ par leur nom.
Avec les élèves, travailler sur la mythologie et les légendes entourant les Pléiades, ce qui peut être motivant.
Faire une nouvelle requête en augmentant la magnitude limite et donc le nombre d'étoiles recensées.
Choisir un code couleur pour chaque étoile en fonction de sa température.
Explorer d'autres amas, des constellations…

Pour en savoir plus sur GAIA :
sur le site du CNES : https://gaia-mission.cnes.fr/
sur le site de l'ESA : https://www.cosmos.esa.int/web/gaia ■

8 C'est une hypothèse simplificatrice acceptable sur de courtes périodes de temps.

InSight

Thomas Appéré

La sonde InSight de la Nasa s'est posée sur la planète Mars le 26 novembre 2018 à 20 h 54 (heure française). Cet article explique l'objectif de la mission et le rôle essentiel du sismomètre français SEIS pour reconstituer l'histoire de la planète. D'ici deux ans on devrait pouvoir répondre à la question : pourquoi cette planète, initialement « habitable », a-t-elle connue un destin différent de celui de la Terre ?

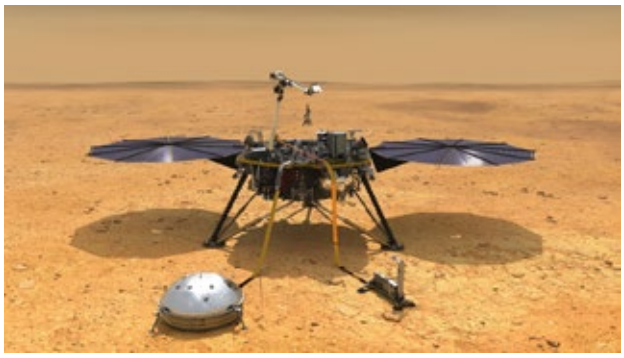
Après un voyage de 485 millions de kilomètres, la sonde InSight est entrée dans l'atmosphère de la planète Mars à près de 20 000 km/h le lundi 26 novembre à 20 h 47. Freinée tout d'abord par son bouclier thermique, elle a déployé ensuite son parachute à une allure supersonique pour ralentir jusqu'à 220 km/h. Elle a allumé ensuite ses rétrofusées pour finalement atterrir dans la plaine d'Elysium à 20 h 53.

Le site d'atterrissage choisi n'a pas la majesté du cratère Gale où s'est posé le rover Curiosity en août 2012. En effet, contrairement à son prédécesseur, l'atterrisseur InSight, statique, n'ira pas arpenter les flancs d'une montagne pour analyser les argiles témoins du passé aqueux de Mars. Sa mission est toute autre : alors que toutes les missions envoyées jusqu'à présent sur Mars ont étudié sa surface et son atmosphère, InSight sondera sa structure interne. L'enjeu est de taille car il s'agit de répondre à une question cruciale : pourquoi Mars a-t-elle connu un destin différent de la Terre ?

La communauté scientifique s'accorde globalement sur un scénario retraçant l'histoire de Mars : il y a 4 milliards d'années, la planète rouge était habitable, recouverte de vastes étendues d'eau liquide. Son atmosphère était alors protégée du vent solaire par un champ magnétique engendré par les mouvements de convection dans le noyau au cœur de la planète. Les roches les plus anciennes témoignent de cet ancien champ magnétique.

Pour une raison encore inconnue, le champ magnétique martien se désactiva. Exposée de plein fouet au vent solaire, l'atmosphère martienne s'éroda progressivement jusqu'à s'amincir si fortement que l'eau en surface gela. Mars devint la planète désertique qu'on connaît actuellement.

Le but de la mission InSight est de comprendre pourquoi les mouvements convectifs du noyau se sont arrêtés. Pour cela, InSight déposera deux instruments directement sur la surface martienne. Le premier instrument est le sismomètre français large bande SEIS (pour Seismic Experiment for Interior Structure). Cet instrument est un bijou de technologie et de miniaturisation conçu par le géophysicien français Philippe Lognonné et son équipe de l'Institut de Physique du Globe de Paris et construit sous maîtrise d'œuvre du CNES. Il est capable de détecter des déplacements inférieurs à la taille d'un demi atome d'hydrogène ! Poser un tel instrument ultrasensible nécessite une surface la moins accidentée possible, ce qui explique le choix du site d'atterrissage, une vaste plaine volcanique située à 550 km au nord de Curiosity, à la frontière entre les hauts plateaux cratérisés de l'hémisphère sud et les basses plaines de l'hémisphère nord. Une fois le sismomètre SEIS déployé à la surface, ce qui prendra jusqu'à deux mois, un bouclier de protection thermique et éolien viendra le recouvrir pour limiter les vibrations parasites.



Les scientifiques s'attendent à détecter jusqu'à 20 séismes de magnitude 4,5 au cours de la mission initiale de 2 ans en raison du refroidissement de la lithosphère martienne. Si Mars s'avère moins active que prévu, les impacts réguliers des météores serviront de sources sismiques. InSight devrait aussi pouvoir détecter les marées engendrées par le satellite Phobos. Ces sismogrammes permettront de caractériser la taille du noyau, du manteau et de la croûte martienne. Lorsque la planète Mars s'est formée il y a 4,5 milliards d'années, le fer a migré

au centre, formant le noyau, et les silicates sont remontés à la surface. En mesurant précisément le rayon du noyau, on accédera au rapport de la quantité de fer sur la quantité de silicates. Le sismomètre SEIS nous permettra de remonter dans le temps jusqu'à la formation de Mars et de mieux comprendre la formation des planètes telluriques.

Le second instrument déposé à la surface s'appelle HP3. Conçu par l'agence spatiale allemande, ce capteur de flux thermique enfoncera une taupe mécanique autopropulsée jusqu'à 5 mètres de profondeur, une première. Contrairement à la Terre, Mars semble avoir perdu une grande partie de sa chaleur interne. Reste-t-il encore en profondeur des poches de magma, ultimes reliques d'un moteur planétaire autrefois actif ? La détermination du budget énergétique global est cruciale pour les planétologues.

La sonde InSight dispose également d'un magnétomètre pour mesurer le champ magnétique résiduel de la planète directement depuis la surface, ce qui n'avait jamais été fait auparavant et d'une station météorologique pour caractériser l'influence de l'environnement martien (température, vent) sur les mesures effectuées par le sismomètre SEIS. Enfin, le système de télécommunication de la sonde InSight sera mis à contribution pour caractériser très finement la précession et la nutation de Mars, dont les périodes dépendent de la structure interne de la planète.

RECENSION

L'ordre du temps, Carlo Rovelli, Flammarion

Carlo Rovelli est un scientifique connu principalement pour ses travaux sur la théorie de la « gravité quantique à boucles », une théorie qui - comme la théorie des cordes - cherche à concilier la relativité générale et la physique quantique. La gravité quantique à boucles vise à donner un sens cohérent à un monde sans temps.

Il nous propose donc un voyage vers un univers d'où le temps est absent. Puis un voyage retour pour comprendre comment a pu émerger notre sensation du temps

L'effritement du temps

L'auteur nous rappelle les différents éléments qui l'ont conduit à se passer du temps, à travers les filtres de l'évolution de la connaissance scientifique.

Il part du temps absolu de Newton puis aborde brièvement le cas de la relativité restreinte avec le concept de « temps propre » qu'il illustre avec des exemples frappants. Si, dit-il, on considère deux personnes, l'une immobile et l'autre marchant d'avant en arrière : « Le temps passe plus lentement pour celui qui marche ». D'une manière générale pour tout ce qui bouge, le temps passe plus lentement.

En relativité générale (RG) il prend un autre exemple un peu surprenant : deux amis se séparent, l'un décide de vivre en plaine, l'autre s'installe à la montagne ; ils se retrouvent plusieurs années plus tard ; celui qui vivait en plaine a moins vieilli : « ses plantes ont moins poussé, le mécanisme de son coucou a oscillé moins de fois »… « En bas, il y a moins de temps qu'en haut » et même si ce n'est pas notable le temps s'écoule plus lentement pour nos pieds que pour notre tête. En définitive « Le temps est ralenti par les masses et par la vitesse ». On peut du reste noter que ces deux effets sont pris en compte dans le fonctionnement des GPS.

Il y a vingt-six siècles, le philosophe grec Anaximandre écrivait : « Les choses se transforment l'une dans l'autre selon la nécessité et se rendent justice **selon l'ordre du temps** ». L'astronomie et la physique se sont développés en suivant l'indication d'Anaximandre. La physique est la science dont les choses évoluent « selon l'ordre du temps ».

Nous vivons avec l'illusion d'un temps unique.

Des horloges identiques qui se déplacent à des vitesses différentes n'indiquent pas le même temps. Quelle est alors la vraie valeur du temps ? La question n'a aucun sens, chaque point de l'espace a un temps différent.

La physique ne décrit pas comment les choses évoluent « dans le temps », mais comment elles évoluent dans leurs temps propre et comment ces temps évoluent les uns par rapport aux autres ». Le temps a perdu son unicité.

Pour nous le temps semble orienté du passé vers le futur. Pourtant cette orientation n'existe pas au niveau des lois élémentaires de la mécanique ; aucune des lois élémentaires de la physique ne distingue le passé du futur. En changeant (t) par (– t), on change le sens du mouvement, pas les équations de la physique classique.

L'auteur aborde alors le monde de la thermodynamique et particulièrement le concept d'entropie. Dans un système isolé, l'entropie augmente ou reste constante, elle ne diminue jamais nous dit le deuxième principe de la thermodynamique qui s'exprime par l'équation $\Delta S \geq 0$; c'est l'unique équation de physique fondamentale qui reconnaît une différence entre le passé et le futur. À notre échelle, le temps est donc orienté.

Pour Carlo Rovelli énergie et temps sont des grandeurs conjuguées. L'énergie est ce qui gouverne l'évolution du temps. Ce lien étroit conduit finalement l'auteur à parler d'un « temps thermique ». « Là où il y a de la chaleur, et là seulement, apparaît une distinction entre le passé et le futur ».

Il est temps de passer à un monde sans temps… C'est l'objet d'une deuxième partie fort brève. La troisième et dernière revient sur les sources du temps

La proposition de certains scientifiques est un monde sans temps

L'écoulement du temps n'est peut-être pas une caractéristique de l'Univers.

Carlo Rovelli nous explique que l'on peut très bien continuer à vivre « sans le Roi Temps».

Nous pouvons voir le monde sans temps, voir avec les yeux de l'esprit la structure profonde du monde où le temps que nous connaissons n'existe plus.

Toute l'évolution de la science indique que la meilleure grammaire pour penser le monde est celle **du changement** et non celle de la permanence, celle **des évènements** et pas des choses. Elle décrit donc le monde tel qu'il se produit et non tel qu'il est, dans son devenir et non dans son être.

Les sources de notre temps : le parfum de la madeleine

Dans ce monde sans temps, il doit y avoir malgré tout quelque chose qui est à l'origine du temps que nous connaissons et qui doit émerger autour de nous, à notre échelle, pour nous. Carlo Rovelli expose les sources de cette vision d'un monde structuré par le temps.

Notre vision du monde est floue car notre vision ne concerne qu'une toute petite partie des interactions physiques entre nous et la partie du monde à laquelle nous accédons. Elle dépend aussi de ce que nous ne voyons pas, parce qu'elle dépend du nombre de configurations *indistinguables*. Chaque regard que nous posons sur le monde n'est qu'une perspective particulière. Nous observons l'univers de l'intérieur, en interagissant avec une minuscule portion des innombrables variables du cosmos. Nous en avons une image floue.

Depuis **notre** perspective, la perspective de créatures qui ne sont qu'une petite partie du monde, nous voyons le monde s'écouler dans le temps. Notre interaction avec le monde est partielle, c'est la raison pour laquelle nous le voyons flou.

L'auteur déclare que « nous comprendre nous-même revient à réfléchir sur le temps, mais comprendre le temps revient à réfléchir sur nous-mêmes » et que nous commençons à découvrir que « nous sommes le temps ». Il reprend sous une autre forme, moins poétique, ce qu'exprimait l'écrivain Jorge Luis Borges « Nous sommes le temps » poème de 1985.

Finalement, notre temps traduit les changements enregistrés par la mémoire ; la grammaire de nombreuses langues modernes décline les verbes en « présent », « passé », et « futur ». Mais la structure de la réalité n'est pas celle que notre grammaire présuppose.

En conclusion

Cette étude du temps est d'une grande richesse et met au clair des questions qui heurtent notre sens commun avec des exemples simples. Elle propose des justifications à cette divergence entre le temps des physiciens (qui s'est effrité jusqu'à disparaître..) et notre temps vécu, celui qui est porté par notre grammaire et qui régit nos vies.

Partant du concept de temps en physique, elle aborde assez rapidement l'aspect philosophique.

Dans cet essai, n'espérez pas en savoir davantage sur « la gravitation quantique à boucles ».

Ce livre ne se déroule pas comme un long fleuve tranquille ; on peut y entrer par différentes parties et la lecture en est toujours plaisante.

Christian Larcher

VIE ASSOCIATIVE

L'éclipse totale de Lune du 21 janvier 2019 au matin

Le matin du 21 janvier, la Lune va traverser l'ombre de la Terre. Depuis la France métropolitaine, on pourra observer l'ensemble du phénomène à condition de se lever tôt et que le ciel soit dégagé. Profitez-en, les prochaines éclipses totales de Lune ne seront visibles qu'en partie depuis la France (en 2022 et 2025).

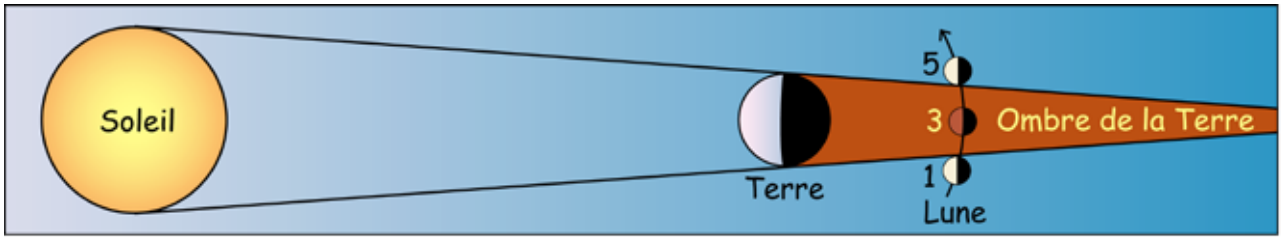


Fig.1. *Principe d'une éclipse de Lune (le schéma n'est pas à l'échelle).*

Les horaires de l'éclipse (heures légales)

1. 4 h 34 : Entrée dans l'ombre.
2. 5 h 41 : Début de la totalité.
3. 6 h 12 : Maximum de l'éclipse.
4. 6 h 43 : Fin de la totalité.
5. 7 h 51 : Fin de l'éclipse.

Toute l'éclipse sera visible depuis la France métropolitaine puisque la Lune ne se couchera qu'après 8 heures (8 h 06 à Nice, 9 h 10 à Brest).
À l'île de la Réunion, l'éclipse ne sera pas visible alors qu'on pourra l'observer dans sa totalité aux Antilles et depuis toute l'Amérique.

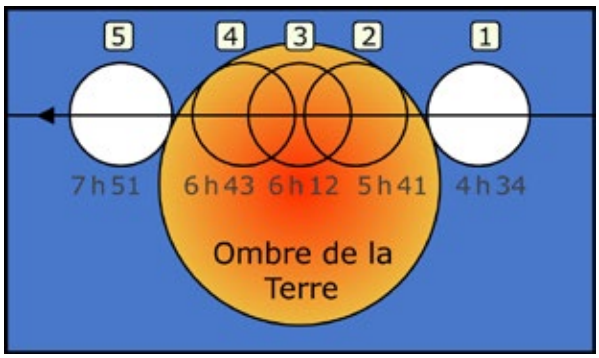


Fig.2. *La Lune traversant l'ombre de la Terre entre 4 h 34 et 7 h 51 (heures légales). En réalité, cette ombre n'est pas visible dans le ciel. Pour la voir comme sur le schéma, il faudrait installer un immense écran dans l'espace.*

Comment observer l'éclipse ?

Le phénomène sera à observer à l'ouest. Au début de la totalité, la Lune sera située assez haut dans le ciel (à environ 40°) et sera donc facile à observer. Sa hauteur au-dessus de l'horizon diminuera ensuite pour n'atteindre que quelques degrés à la fin de l'éclipse (ces hauteurs varient d'une région à l'autre). Il faudra donc choisir un site avec un horizon ouest-nord-ouest dégagé. La sortie de l'ombre sera plus difficile à observer depuis le Sud-Est de la France car elle aura lieu peu avant le lever du Soleil.

Une éclipse de Lune peut s'observer à l'œil nu, mais c'est encore mieux avec des jumelles.

Juste avant l'éclipse (donc avant 4 h 34), on voit la Lune entièrement éclairée (c'est la pleine Lune).

Pendant l'entrée dans l'ombre de la Terre (entre 4 h 34 et 5 h 41) ainsi que pendant la sortie de l'ombre (de 6 h 43 à 7 h 51), la Lune est en partie éclipsée et on distingue bien la forme de l'ombre (figure 3). On peut en déduire que la Terre est ronde. Grâce à cette ombre, on a même pu montrer que le diamètre de la Terre vaut entre 3 et 4 fois le diamètre de la Lune.

Pendant la totalité, la Lune apparaît rouge sombre (figures 3 et 4).

Fig.3. Montage de trois photos de l'éclipse de Lune du 3 mars 2007 faisant apparaître l'ombre de la Terre.

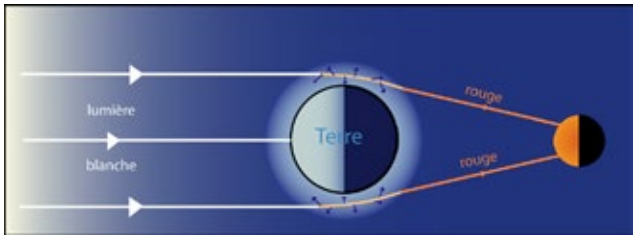


Fig.4. *Au moment où l'éclipse est totale, la Lune n'est pas totalement invisible comme on pourrait le croire ; elle apparaît rouge plus ou moins sombre. Elle est faiblement éclairée par des rayons lumineux en provenance du Soleil qui ont été déviés et rougis en frôlant la Terre et en traversant la haute atmosphère.*

Le hors-série n° 14 LE SOLEIL est arrivé

SOMMAIRE GÉNÉRAL

Dans le livret (366 pages 22 €)

Chapitre 1 : Observer le Soleil	page 7
Chapitre 2 : Mouvements apparents du Soleil	page 103
Chapitre 3 : Un peu de physique solaire	page 165
Chapitre 4 : Mesures	page 225
Chapitre 5 : La lumière du Soleil	page 263
Chapitre 6 : Soleil et imaginaire	page 315
Sommaire détaillé	page 363
Index	page 365

Disponible sur un site dédié au HS 14 sur le site du CLEA

- Les compléments
- Les annexes
- Des films
- Les sites à consulter
- Une liste de logiciels
- La liste des articles parus dans les Cahiers Clairaut

Les compléments et annexes au livret sont consultables sur le site de vente du CLEA onglet hors-série HS14.

Solution au problème de la date de Pâques (pages 25 du numéro 163 de septembre)

Rappel de l'énoncé

On entend souvent dire que Pâques a lieu le 1er dimanche qui suit la pleine Lune qui suit l'équinoxe de printemps. En 2019, l'équinoxe aura lieu le 20 mars, la pleine Lune le jeudi 21 mars et le dimanche qui suit est le 24 mars. Pourtant, les calendriers donnent pour Pâques la date du 21 avril. Où est l'erreur ?

Solution

La définition correcte de la date de Pâques est celle-ci : Pâques est le dimanche qui suit le 14e jour de la Lune qui atteint cet âge le 21 mars ou immédiatement après.

C'est presque la même chose mais pas tout à fait :

- le 14e jour de la Lune, c'est en général la pleine Lune mais pas toujours et de plus, il s'agit dans cette définition de la Lune ecclésiastique (une lune fictive moyenne) ;
- l'équinoxe tombe en gros le 21 mars, mais ce sera le 20 mars en 2019 et ce, jusqu'en 2044 (où il tombera le 19).

Le calcul de la nouvelle Lune dans ce comput ecclésiastique se fait à partir de l'épacte et donne le 5 mars puis le 4 avril (au lieu du 6 mars et du 5 avril pour la vraie nouvelle Lune).

Le 14e jour de la Lune, ce sera donc le 19 mars puis le 18 avril (21 mars et 19 avril pour la vraie pleine Lune).

Le 19 mars, c'est trop tôt puisqu'il faut passer le 21 mars, on choisit donc le 18 avril et le dimanche qui suit sera le 21 avril.

Pour plus de renseignement, vous pouvez consulter :

- l'article de Véronique Hauguel « Cycle lunaire, nombre d'or et épacte » dans le n° 136 des Cahiers Clairaut de 2011 (clea-astro.eu/archives).
- les volvelles de Denoville en particulier celle donnant la date de Pâques (D23-24) sur le site de l'ASSP de Rouen (http://assprouen.free.fr/denoville/volvelles.php).

Solutions des mots croisés

Horizontalement : **1.** Cylindrique. **2.** ESA. Eau. URL. **3.** Now. Gaia. **4.** Lointain. Np (Neptunium). **5.** Aratos. Ehia. **6.** Bayer. **7.** Idée. Fond (comme le fond diffus cosmologique…). **8.** Uranometria. **9.** Su. Terriens.

Verticalement : **1.** Cellarius. **2.** Ys. Or. Dru. **3.** Laniakea. **4.** Ont. Ent (partie entière). **5.** Newton. OE (ouest est). **6.** Da (comme déca). As. FMR (éphémère). **7.** Rugi. Boer. **9.** Qui. Hydre. **10.** Uranie. In. **11.** El. Parkas.

Vous souhaitez débuter ou
vous perfectionner en astronomie ?

Vous avez envie de développer vos savoir-faire pédagogiques au contact de collègues expérimentés ?

Venez participer au col Bayard, à une école d'été d'astronomie, dans un cadre majestueux.

Exposés accessibles à tous, ateliers pratiques et observations du ciel : toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

Renseignements et vidéo sur :
http://clea-astro.eu/aLaUne/EcolesdEtedAstronomie

Les productions du CLEA

En plus du bulletin de liaison entre les abonnés que sont les Cahiers Clairaut, le CLEA a réalisé diverses productions.
Fruit d'expérimentations, d'échanges, de mises au point et de réflexions pédagogiques d'astronomes et d'enseignants d'écoles, de collèges, de lycées, ces productions se présentent sous différentes formes :

Fiches pédagogiques

Ce sont des hors-série des Cahiers Clairaut conçus par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA : astronomie à l'école, la Lune, gravitation et lumière, mathématique et astronomie, …
HS10 Mathématiques et astronomie (2012)
HS11 Les constellations (2014)
HS12 L'astronomie à l'école (2016)
HS14 Le Soleil (2018)

Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

Repérage dans l'espace et le temps, le mouvement des astres, la lumière messagère des astres, vie et mort des étoiles, univers extragalactique et cosmologique, …

Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction.

DVD

Les archives du CLEA de 1978 à 2006 (Cahiers Clairaut et Écoles d'Eté d'Astronomie).

Vous pouvez retrouver ces productions sur le site de vente : http://ventes.clea-astro.eu/

Le formulaire de commande est sur le site.

Le site internet

Une information toujours actualisée

http://www.clea-astro.eu

LES CAHIERS CLAIRAUT

Publiés quatre fois par an, aux équinoxes et aux solstices, les Cahiers Clairaut offrent des rubriques très variées :

Articles de fond
Réflexions
Reportages
Textes (extraits, citations, analyses)
Pédagogie de la maternelle au supérieur
TP et exercices
Curiosités
Histoire de l'astronomie
Réalisations d'instruments et de maquettes
Observations
Informatique
Les Potins de la Voie Lactée

COMMENT NOUS JOINDRE ?

Informations générales :

http://www.clea-astro.eu
ou
http://www.ac-nice.fr/clea

Siège social :

CLEA, c/o CAPE
case courrier 7078
Université Paris Diderot
5, rue Thomas Mann
75205 PARIS Cedex

École d'Été d'Astronomie :

daniele-imbault@laposte.net

Cahiers Clairaut :

christianlarcher3@gmail.com

Ventes des productions :

http://ventes.clea-astro.eu/

Site internet :

berthomi@ac-nice.fr
charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr

Adhésion / Abonnement :

Adhésion CLEA pour 2018 :	**10 €**
Abonnement CC pour 2018 :	**25 €**
Adhésion + abonnement CC :	**35 €**
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	**40 €**

Les adhésions, abonnements et achats peuvent se faire directement en ligne sur le site : http://ventes.clea-astro.eu/

Directrice de la Publication : Cécile Ferrari
Rédacteur de publication : Christian Larcher
Imprimerie Grapho12, 12200 Villefranche de Rouergue
Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979
Numéro CPPAP : 0315 G 89368
Prix au numéro : 9 €
Revue trimestrielle : numéro 164 hiver 2018