



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

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

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

Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

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

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

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

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

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

Présidents d'honneur

Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel
Cécile Ferrari

Bureau du CLEA pour 2024

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

Responsables des groupes

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



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

Fawzi Benarbia, Allan Sacha Brun, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Gaël Cessateur, Aude Chambodut, Pierre Chastenay, Marie-France Duval, Olivier Gayraud, François Hurter, Christian Larcher, Joël Lebras, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Pierre Le Fur, Fabrice Maquère, Aurélie Marchaudon, Xavier Plouchard, Raphaël Mellac, Barbara Perri, Frédéric Pitout, Jean Ripert, Béatrice Sandré, Serge Tricoire, Grace Staton, Jean-Michel Vienney.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 186 afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Aurore boréale photographiée dans la nuit du vendredi 10 au samedi 11 mai 2024 depuis le Champ du Feu dans les Vosges (67), à 1 000 m d'altitude. Cette nuit-là, des aurores boréales ont été observées et photographiées depuis toute la France métropolitaine, et même en Espagne. Des aurores australes ont également été vues depuis l'Australie et la Nouvelle-Zélande. Elles font suite à plusieurs éruptions solaires qui se sont déroulées sur le Soleil côté Terre. Vous trouverez plus d'informations sur cet événement page 20.

Photographie de Fabrice Maquère. Nikon D750, pause de 10 s à 1600 ISO, objectif de 24 mm ouvert à 5,6.

Les Cahiers Clairaut

Été 2024

Éditorial

De nombreuses personnes ont pu contempler le vendredi 10 ou le samedi 11 mai 2024 de superbes aurores polaires dans le ciel nocturne français. Une bonne occasion de pénétrer le mécanisme complexe de leur formation dans le thème consacré au magnétisme qui s'inscrit dans le dispositif «Année de la physique»¹ dans le cadre de la labellisation «autour de la semaine de la météorologie de l'espace»². Certains articles sont un peu techniques aussi dans cet éditorial je m'intéresserai plutôt aux explications imaginaires qu'en donnaient les anciens.

Pour certains peuples samis, c'est le renard polaire qui, en courant dans le ciel, frottait les montagnes de sa queue et provoquait des étincelles qui illuminaient les cieux. Certains Inuits les attribuaient à la danse des esprits des animaux tels que les saumons, les phoques, les bélugas et les cerfs ; les Danois y voyaient les cygnes se mettant au défi de voler le plus au nord possible.

En Europe, où la couleur est plus rouge, elles étaient associées au sang et à la guerre : les Vikings convoquaient les armures des Valkyries, vierges guerrières à cheval dont les lances et les boucliers reflètent le Soleil et la Lune. Les Chinois y décelaient une bagarre de dragons.

Mais ce pouvait aussi être une manifestation terrestre de l'âme des défunts : pour une tribu indienne, c'étaient les fantômes des ennemis qu'ils avaient abattus qui venaient se venger, mais pour les Inuits de la baie d'Hudson c'étaient les esprits déjà au paradis qui cherchaient à guider les nouveaux arrivants en allumant des torches.

Ce pouvait donc être un message plutôt positif ; de façon plus pragmatique en Suède elles étaient un cadeau des dieux bienveillants et signe de bonne pêche !

Comme dans chaque numéro vous trouverez des activités à réaliser avec des élèves. Toute l'équipe de rédaction vous souhaite de passer de sympathiques vacances



Christian Larcher (pour l'équipe)

Sommaire

Actualités

Brèves d'observatoires et autres nouvelles

Frédéric Pitout

p 2

Avec nos élèves

L'âge de la nébuleuse du Crabe revisité

Olivier Gayraud, Béatrice Sandré

p 6

Observation

Visite de la Voie lactée (2)

Pierre Le Fur

p 11

Dossier : Magnétisme

p 14

Article de fond

Le Soleil magnétique et la météorologie de l'espace

Barbara Perri, Allan Sacha Brun

p 15

Actualités

Orage magnétique du 10-12 mai

Frédéric Pitout

p 20

Article de fond

Aurores dans le Système solaire

Gaël Cessateur

p 23

Article de fond

Le géomagnétisme et la météorologie de l'espace

Aude Chambodut, Aurélie Marchaudon

p 29

Avec nos élèves

Mise en évidence du champ magnétique terrestre

Serge Tricoire

p 34

Mots croisés et magnétisme dans CC

p 38

Observation

Le ciel d'été 2024

Pierre Causeret

p 39

Avec nos élèves

Solar Orbiter

Joël Lebras

p 40

Didactique

Les élèves astronomes

Pierre Chastenay

p 45

Solution mots croisés

p 46

Retour aux sources

Kepler (fin)

K. Mizar

p 47

¹ <https://anneedelaphysique.cnrs.fr/>

² <http://www.meteo-espace.fr/meteo-espace/fr>



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

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

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



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

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

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



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

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

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



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

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

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

L'ÂGE DE LA NÉBULEUSE DU CRABE REVISITÉ

Béatrice Sandré et Olivier Gayrard

L'article suivant est une reprise du hors-série n° 6 des Cahiers Clairaut en date du 6 octobre 1994. Ce travail a été impulsé par Christian Larcher et motivé par les nouvelles images produites par les télescopes spatiaux Hubble et James Webb. Par ailleurs l'informatique a largement évolué depuis l'activité originale, et permettra au lecteur curieux de retrouver l'âge de la nébuleuse du Crabe à l'aide des nouvelles technologies.

Introduction historique

Le 4 juillet 1054, l'astronome chinois Yang Wei-Tê remarqua dans la constellation du Taureau une étoile aussi brillante que la planète Vénus. Quand le Soleil se leva, l'étoile continua d'être visible et pourtant ce n'était pas la planète Vénus ! Mais les cartes célestes établies avec beaucoup de soin par les astronomes de l'empire chinois ne laissaient aucun doute : jusqu'à présent aucune étoile d'un tel éclat n'avait été observée dans cette direction. Elle resta observable pendant le jour durant plus de trois semaines, mais son éclat diminuait progressivement et au bout de 600 nuits, elle redevint invisible aux observations visuelles. Pour redécouvrir cette étoile, il faudra attendre l'invention des télescopes et aussi l'intervention du hasard...

En 1731, l'astronome amateur anglais John Bevis observa une «nébuleuse» dans la constellation du Taureau, mais ignorait les observations chinoises. C'est Lord Rosse, qui en 1840, de part son aspect lui donna le nom de «Nébuleuse du Crabe». Notons que Charles Messier, astronome français, découvrit en 1758, la nébuleuse du Crabe, indépendamment de J. Bevis, alors qu'il recherchait la comète de Halley qui devait réapparaître dans cette région du ciel. La nébuleuse du Crabe est répertoriée comme l'objet Messier 1 dans le catalogue des nébuleuses réalisé par Messier.

Messier 1 fut photographiée pour la première fois par l'astronome John Duncan à l'observatoire du Mont Wilson ; à partir de deux clichés pris à 12 ans d'intervalle, J.Duncan montra en 1921 que la nébuleuse était en expansion. En 1928, Edwin Hubble estima l'expansion de la nébuleuse devait avoir débuté environ 900 ans plus tôt et fit le rapprochement avec l'observation de l'étoile nouvelle notée par les astronomes chinois en 1054.

L'activité

Comme pour l'activité originale, il s'agit de comparer deux photographies réalisées à différentes époques. La reconnaissance de détails identiques, ainsi que leur évolution, permettront une mesure de la vitesse

d'expansion et ainsi pourrions-nous remonter à l'estimation de l'âge de la nébuleuse du Crabe, identifiée au reste de la supernova de 1054.

Les images

Les photographies des télescopes de 2,5 m du Mont Wilson et du 4 m de l'observatoire de Kitt Peak sont donc remplacées par une photographie du Hubble Space Telescope (HST) (1) et une seconde du James Webb Space Telescope (JWST) (2). L'image figure 1 a été assemblée à partir de 24 expositions individuelles prises avec la caméra planétaire n° 2 en octobre 1999, janvier 2000 et décembre 2000. Les couleurs de l'image indiquent les différents éléments qui ont été expulsés lors de l'explosion. Le bleu dans les filaments de la partie externe de la nébuleuse représente l'oxygène neutre, le vert le soufre une fois ionisé et le rouge l'oxygène doublement ionisé. L'image est téléchargeable depuis le lien (1) en différents formats. Pour avoir accès aux images individuelles ainsi qu'à leurs caractéristiques, filtres et temps de pose, il suffit de cliquer dans la partie « À propos des données » sur le numéro de la proposition 8 222. L'image figure 2 a été prise par la NIRCam (Near-Infrared Camera) et le MIRI (Mid-Infrared Instrument) du JWST. De nouveaux détails dans la lumière infrarouge sont révélés. L'assemblage des images prises les 31 octobre 2022, 24 février 2023 et 17 mars 2023 font apparaître au centre de la structure en forme d'anneau un point blanc brillant : une étoile à neutrons en rotation rapide. Le téléchargement et les détails des filtres utilisés sont à retrouver dans le lien (2). On aura remarqué que ces images ne sont pas des poses uniques, contrairement à l'exercice d'origine, ce qui dégrade la qualité du travail que nous allons à présent mener.

Elles sont aussi réalisées dans des domaines de longueurs d'onde différentes. Mais, on peut constater sur les figures 3 et 4 par exemple que les formes des détails sont rigoureusement identiques. Ceci n'est possible que si la nébuleuse émet simultanément dans les deux domaines de longueurs d'onde. Les deux images sont donc comparables.



Fig.1. HST.



Fig.2. JWST.



Fig.3. Détail de l'image du HST.



Fig.4. Détail de l'image du JWST.

Échelle et repérage du centre de la nébuleuse dans l'image du HST

Dans la manipulation du HS 6, les distances angulaires séparant deux étoiles explicitement nommées sur la carte étaient données de façon ad hoc. Nous allons maintenant mettre à l'échelle nos deux nouvelles photographies. Pour cela rien de plus simple, nous allons d'abord utiliser le site web nova.astrometry.net (3). Astrometry.net consiste en une suite de logiciels, permettant d'effectuer efficacement l'astrométrie. Dans le cas qui nous intéresse ici, il permet de fournir un en-tête standard contenant les transformations de coordonnées entre les coordonnées (X,Y) d'une image et les coordonnées (RA,DEC) en format J2000.

Charger le fichier de la figure 1 puis cliquer sur Upload. L'opération de calibration peut prendre un peu de temps. Cliquer sur Go to results page. De nombreux renseignements apparaissent quant à la calibration. Ne reste plus qu'à télécharger le fichier calibré en .fit en cliquant sur new-image.fit. Pour ouvrir cette image nous allons utiliser Aladin (4), préalablement installé sur notre machine. Aladin est un atlas du ciel. C'est un logiciel de recherche de données à partir d'images. Il permet l'accès interactif, la visualisation et l'analyse des relevés scientifiques des grandes agences spatiales et des centres de données. Taper M1 dans la ligne de commande. Après quelques instants la nébuleuse apparaît dans la fenêtre. Afficher deux cadres en suivant le chemin « Vue » / « Cadres » / « 2 cadres horiz ». Chercher l'image de M1 du HST depuis l'explorateur : « Fichier » / « Charger un fichier local ». Les deux images apparaissent.



Fig.5. Écran d'accueil d'Aladin.

Ne reste plus qu'à les orienter de la même façon, nord en haut et est à gauche. « Vue » / « Uniformiser l'échelle et l'orientation ». Tout se passe automatiquement puisque les deux images sont calibrées.

Par commodité, mettre le nord en haut en cliquant sur « Image » / « symétrie ». Dans la ligne de commande écrire V* CM Tau. C'est le nom du pulsar de cette

nébuleuse. Cliquer sur entrer. Une croix apparaît sur chacune des images (Aladin et HST), indiquant la position du pulsar.

Échelle, repérage du centre de la nébuleuse dans l'image du JWST et détermination du déplacement de chaque filament

Nous présenterons deux possibilités ; notre préférence allant à la seconde. En effet, l'utilisation unique d'Aladin fait disparaître l'exploitation de l'échelle, ce qui est dommage pour un exercice visant par exemple des élèves.

Méthode 1 avec Aladin

Comment calibrer l'image du JWST ? C'est un peu plus compliqué car astrometry.net ne parvient pas à faire la réduction astrométrique. Et oui ! Dans l'infrarouge de « nouvelles » étoiles sont apparues. Pour cela nous allons choisir sept étoiles de référence réparties tout autour de la nébuleuse Messier 1. Attention, il peut être compliqué de repérer les mêmes étoiles à travers les filtres différents de HST et du JWST ! Ouvrir 4 cadres dans Aladin (« vue » / « cadres » / « 4 cadres ») et charger l'image de M1 prise par le JWST (non calibrée). Réorienter celle-ci (« Image » / « symétrie » / « haut/bas »). Réaliser une calibration astrométrique en choisissant la méthode par correspondance d'étoiles. « Image » / « Calibration astrométrique ». Cliquer dans l'image du JWST pour récupérer les coordonnées x et y, puis dans l'image du DSS color pour récupérer les coordonnées en RA et Dec correspondantes. Zoomer le plus possible pour augmenter la précision. Une fois le tableau complété avec sept étoiles, cliquer sur « Créer » puis « Fermer ». En tapant dans la

ligne de commande V* CM Tau il est possible de vérifier la qualité de son travail. Le pulsar est bien pointé dans les deux images qui nous intéressent, (figure 6). Sinon une étoile de calibration a été mal choisie.

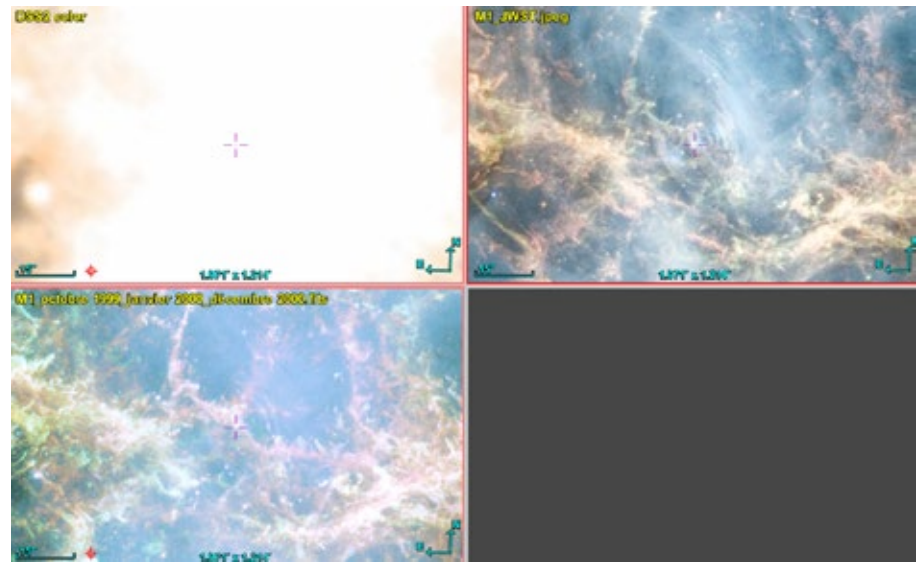


Fig.6. Les deux images HST et JWST parfaitement calibrées.

Il est alors aisé en utilisant l'outil « Mesure de distance » de relever directement à l'écran les distances angulaires en seconde d'arc entre le pulsar et l'extrémité d'un filament bien identifiable de la nébuleuse sur les deux clichés, α ("). La variation de la distance angulaire en seconde d'arc, $\Delta\alpha$ ("), du pulsar à la même extrémité d'un filament entre les deux dates est obtenue en calculant $\Delta\alpha = \alpha_{2023} - \alpha_{2000}$. Il s'en déduit la vitesse angulaire ω ("/an) de déplacement : $\omega = \Delta\alpha / \Delta t$ puis T l'âge cinématique en années ; temps écoulé depuis le début de l'expansion de la nébuleuse : $T = \alpha_{2023} / \omega$. Ici il est fait comme hypothèse que chaque point ait conservé la même vitesse au cours du temps.

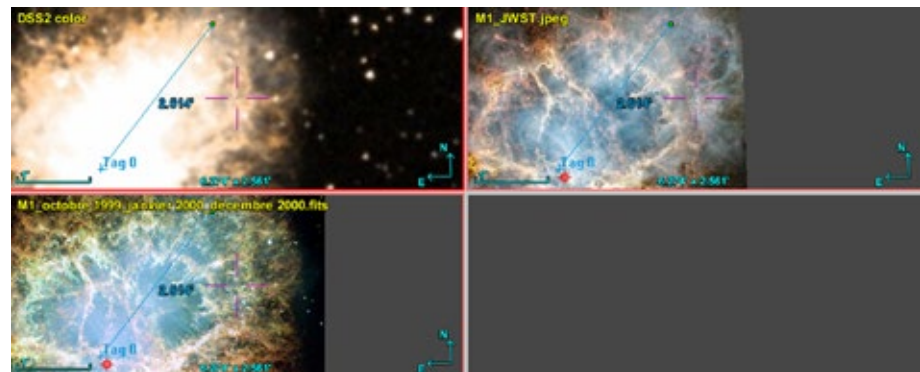


Fig.7. Mesure de la distance angulaire entre la position du pulsar et celle d'un détail de l'image du HST. La manipulation doit être reproduite dans l'image du JWST.

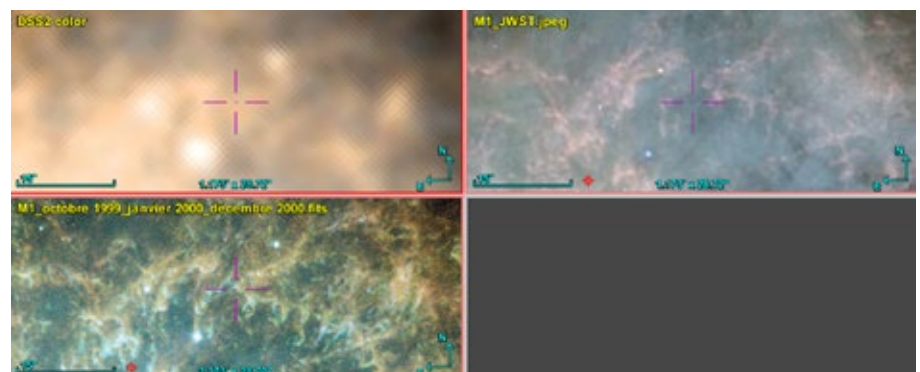


Fig.8. Gros plan du détail de la figure précédente.

Méthode 2 avec un logiciel de traitement de photographie numérique

Commençons par la mise à l'échelle. Nous avons utilisé le logiciel Photoshop mais il peut être remplacé par GIMP ou tout autre logiciel de traitement de photographie numérique. Nous chargeons nos deux images au format jpg. Dans ces images, nous choisissons 14 étoiles de référence réparties tout autour de la nébuleuse Messier 1, figure 9. Attention à nouveau au risque de confusion !



Fig.9. Les étoiles identiques dans chacune des 2 images sont associées 2 par 2 (même couleur de flèches).

Grâce au pointeur (touche F8 pour Photoshop) les coordonnées X et Y (en pixels) de chacune de ces étoiles sont relevées. La séparation angulaire (mesurée en pixels) entre deux étoiles sur chacune des images est

$$d = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$$

Le rapport entre la distance mesurée sur une image et sur l'autre doit être indépendant du couple d'étoiles et fixe l'échelle relative entre les deux images. Tout calcul mené donne comme facteur d'échelle

$$\frac{d_{2023}}{d_{2000}} = 3,1863 \pm 0,0016$$

Avec le logiciel Aladin, nous avons trouvé la position du pulsar sur l'image du HST. En zoomant de façon analogue sur la partie centrale de l'image du JWST, on trouve par identification la position du pulsar sur cette deuxième image. À l'aide du pointeur, relever, avec un maximum de précision les coordonnées X_p et Y_p du centre du pulsar sur chacune des deux photos. De la même façon, relever avec un maximum de précision les coordonnées d'une vingtaine de détails de la nébuleuse repérés dans chacune des deux photographies.

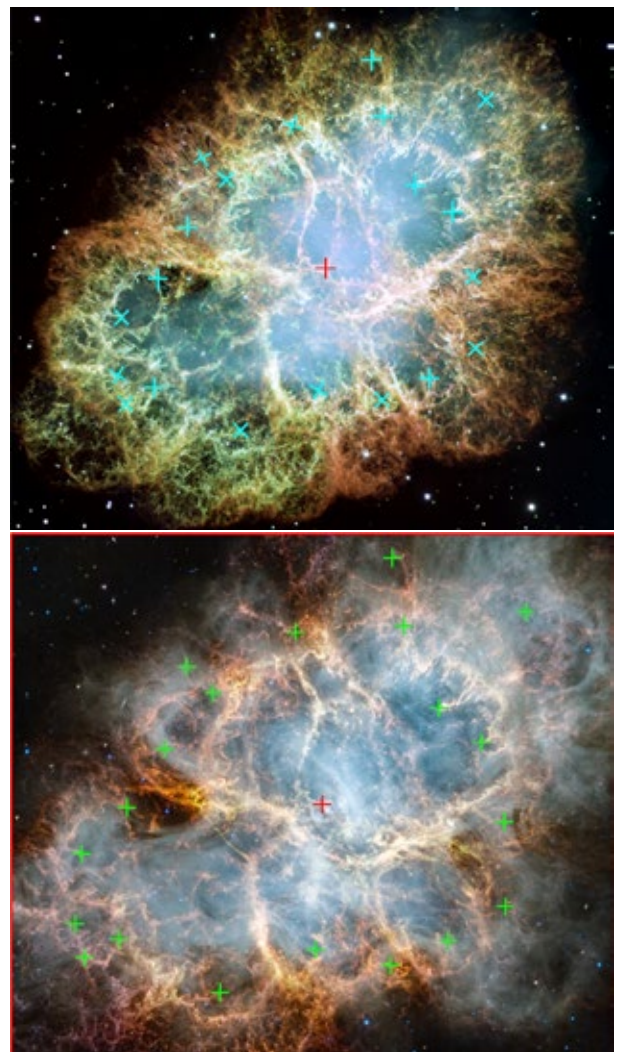


Fig.10. Les détails repérés de la nébuleuse.

La distance angulaire au pulsar (en pixels) est ensuite calculée pour chaque détail et sur chaque photo à l'aide de la relation :

$$d = \sqrt{(X - X_p)^2 + (Y - Y_p)^2}$$

Les résultats sont dans le tableau ci-dessous.

	X2000/px	Y2000/px	d2000/px	X2023/px	Y2023/px	d2023/px		Dr/an
pulsar	2012	1997		5920	4822			
détail 2	936	1985	1076,4	2009	4764	3515,5		942
détail 3	1124	1855	937,9	2669	3722	3055,8		1045
détail 4	1224	1210	1085,8	3045	2281	3547,2		933
détail 5	1374	1355	877,2	3513	2772	2868,9		893
détail 6	1799	1009	971,6	4893	1661	3181,9		851
détail 7	1307	594	1394,6	6632	410	4354,9		940
détail 8	1375	947	1073,1	6835	1571	3506,9		925
détail 9	1584	1385	808,9	7454	3025	2640,0		972
détail 10	2821	1359	901,6	8206	3821	2942,3		974
détail 11	2853	1874	941,2	8594	5004	3079,4		879
détail 12	3033	850	1506,0	8972	1324	4914,3		974
détail 13	2970	2429	1068,0	8607	6482	3506,0		789
détail 14	2678	2616	835,5	7612	7066	3067,9		810
détail 15	2373	2762	882,2	6609	7504	2894,7		797
détail 16	1965	2697	741,3	5292	7239	2427,7		837
détail 17	1470	2949	1130,4	3625	7987	3688,9		974
détail 18	914	2679	1314,1	1864	7051	4281,9		1039
détail 19	733	2784	1323,1	1247	7374	4977,1		923
détail 20	703	2234	1338,0	1213	5563	4368,3		956
							Moyenne	920
							Ecart type	74

En supposant la vitesse d'expansion de la nébuleuse constante, il est possible de calculer depuis combien de temps a eu lieu le phénomène supernova avec la relation suivante :

$$\Delta t = \frac{23 \text{ ans} \times d_{2023}}{d_{2023} - (d_{2000} \times \text{echelle})}$$

La nébuleuse du crabe aurait explosé il y a 920 ans avec une incertitude de l'ordre de 74 ans soit entre l'an 1029 et l'an 1177 et une date médiane de 1103.

Cette valeur, un peu supérieure à la date connue de 1054 peut laisser penser à une accélération de l'expansion. Mais 1054 étant dans le domaine d'incertitude (1029-1177), cette conclusion est sans doute un peu osée !

À notre connaissance, aucune évaluation de l'incertitude n'avait été réalisée dans l'activité du hors-série n° 6 des Cahiers Clairaut de 1994. Les résultats sont donc difficilement comparables.

Conclusion

Les fins détails des images du HST et du JWST nous ont permis des mesures nombreuses et précises, mais l'intervalle de temps entre ces deux clichés reste faible devant l'âge de la nébuleuse.

Le cliché de 1942 (figure 11, téléchargement 5) ne peut être comparé à ceux de 2000 et 2023 (filtres différents, et surtout finesse des détails incomparables).

Une photographie actuelle de résolution semblable aux originaux « historiques » permettrait sans doute moins

de mesures mais sur un intervalle de temps 3,5 fois plus grand.

Nous avons eu la possibilité de réaliser une telle prise de vue le 12 mars 2024 avec le télescope T50 du pic du Midi (figure 12, téléchargement sur le site du CLEA)

Ces deux images devraient permettre de reprendre l'activité et peut-être d'améliorer le résultat en décelant une éventuelle accélération de l'expansion comme des travaux plus anciens l'ont déjà montré (6).

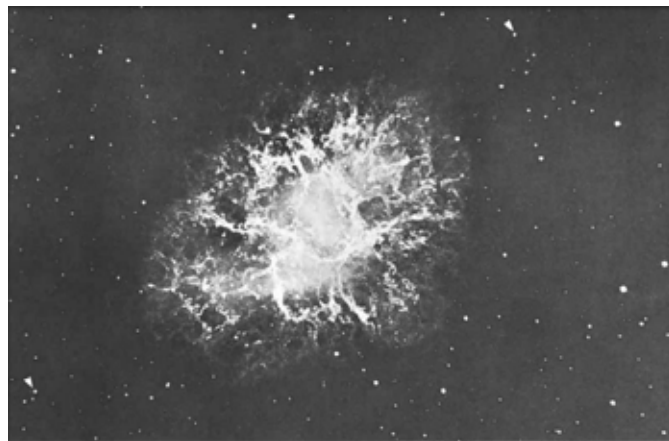


Fig.11. La nébuleuse du Crabe photographiée le 19 janvier 1942 avec le télescope de 2,5 m du Mont Wilson (5). (1 pose de 2,5 heures).



Fig.1. La nébuleuse du Crabe photographiée le 24 mars 2024 avec le T50 du pic du Midi. La caméra est une ZWO ASI 6200 MM. (11 poses de 60 s sans filtre).

- (1) <https://hubblesite.org/contents/media/images/2005/37/1823-Image.html>
- (2) <https://webbtelescope.org/contents/media/images/2023/137/01HBBMDH12APPEGB8DXVVEP8XA>
- (3) <http://nova.astrometry.net/upload>
- (4) <https://aladin.cds.unistra.fr/aladin-f.gml>
- (5) http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/jheidt/praktikum/Astrolab_WS2020/Task7/Crab_Jan_19_1942_rev.png
- (6) <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/129507>



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

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

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



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

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

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



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

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

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



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

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

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



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

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

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



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

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

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



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

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

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



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

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

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



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

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

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

ORAGE MAGNÉTIQUE DES 10-12 MAI 2024

Frédéric Pitout, Observatoire Midi-Pyrénées / Université Toulouse 3 – Paul Sabatier
Institut de recherche en astrophysique et planétologie

Nous aurions voulu le faire, nous n'y serions évidemment pas parvenus : alors que nous préparions ce numéro avec un dossier sur les relations Soleil-Terre et la météorologie de l'espace, une série de violentes

éruptions et d'éjections de matière solaire est parvenue jusqu'à la Terre, provoquant l'orage géomagnétique le plus intense depuis 2003. Cela valait bien un court article, même au débotté.



Fig.1. L'aurore boréale du 10 mai 2024 photographiée depuis l'Île de Ré (photo Xavier Plouchard, animateur scientifique, Muséum d'histoire naturelle de La Rochelle. Pose 4 s 800 ISO Focale de 20 mm ouvert à 2).



Fig.2. Cazelle de Nouvelle (Lot) 4 h, 11 mai pose 2 s 5 000 ISO (Raphaël Melac).

C'est inhabituel parce que rare, le ciel de la France métropolitaine s'est illuminé les nuits du 10 au 12 mai dernier. Des aurores rouges, mauves et même vertes ont été vues un peu partout, signe de l'intensité du phénomène. Rappelons que plus un orage géomagnétique est intense, plus des aurores sont visibles à basses latitudes. Mais au fait, qu'appelle-t-on orage (géo)magnétique ? Et qu'est-ce qui a fait que celui-ci était si intense. Pour le comprendre, il faut remonter le cours du vent solaire jusqu'au Soleil et remonter dans le temps quelques jours auparavant.

Un Soleil proche de son pic d'activité et sous surveillance

Barbara Perri et Sacha Brun nous ont expliqué (voir ce numéro) que l'activité du Soleil présente une périodicité d'environ 11 ans et que nous sommes précisément proche du maximum. Signe de cette activité accrue, notre étoile présente actuellement de nombreuses taches sombres bien visibles en lumière blanche (c'est-à-dire sans sélection d'une couleur particulière) et des filaments (qui eux sont visibles grâce à des filtres qui ne laissent passer que l'émission $H\alpha$ de l'hydrogène) sur son disque, ainsi que des protubérances, parfois éruptives, sur ses limbes. En outre, les jours précédents l'orage géomagnétique, une grosse zone active était présente sur le disque solaire (figure 3). On pouvait donc s'attendre à ce que des événements extrêmes se produisent. C'est précisément ce qu'il s'est passé en mai dernier.

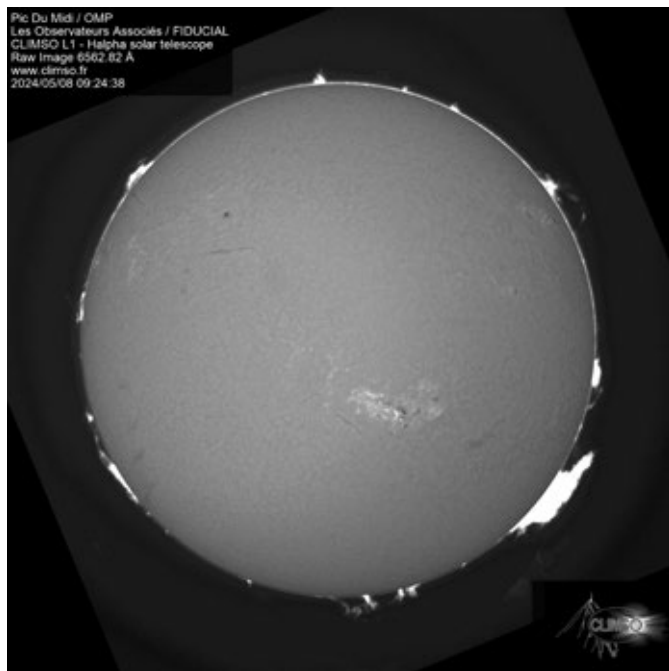


Fig.3. Soleil observé en lumière $H\alpha$ le 8 mai 2024 à 09:24 TU depuis l'observatoire du pic du Midi. Image composite provenant de la lunette solaire L1 et du coronographe C1 (OMP/OA).

Une succession de processus entre le Soleil et la Terre

Les jours qui ont précédé le 10 mai (au moins depuis le 6) des éruptions chromosphériques et des éjections coronales de masses (plus ou moins puissantes et pas toujours dirigées vers la Terre) se sont succédées. Le résultat est que le 10 mai à 16 h 34 TU, un vent solaire très dense et très rapide équivalent à une pression de presque 80 nPa (en période calme, la pression est aux alentours de 2-3 nPa) arrive au niveau de la sonde Dscovr au point de Lagrange 1. Les trois premiers panneaux de la figure 1 montre la concentration du vent solaire (en particules par cm^3), la vitesse du vent solaire (en km/s) et les 3 composants du champ magnétique interplanétaire dans un repère appelé *géocentrique solaire écliptique* (GSE) et dont les directions sont : x vers le Soleil, y vers l'est et z la perpendiculaire au plan de l'écliptique pointant vers le nord.

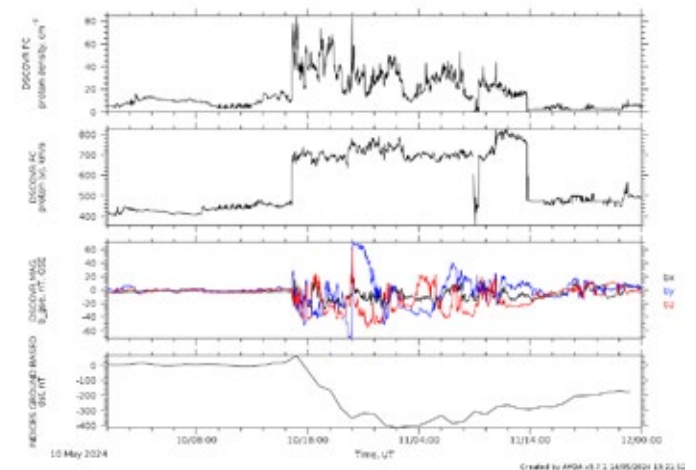


Fig.4. Paramètres du vent solaire mesurés par la sonde Dscovr entre le 10 mai 2024 à 00:00 TU et le 12 mai à 00:00 TU. Les quatre panneaux montrent, de haut en bas, la concentration de vent solaire en particules par cm^3 , la vitesse du vent solaire en km/s , les 3 composants du champ magnétique interplanétaire dans le repère GSE et l'indice magnétique Dst.

Ces mesures prises en amont de la Terre, compte tenu de la vitesse du vent solaire et de la distance entre L1 et la Terre, nous parviennent environ 30 minutes avant que le vent solaire mesuré arrive effectivement au niveau de la Terre. Et rien qu'à voir les courbes, on pouvait savoir que le résultat dans notre environnement spatial allait être d'ampleur. Pourquoi ? Parce que le vent solaire et le champ magnétique interplanétaire qu'il transporte ont tous les ingrédients pour : la densité du vent solaire atteint 80 particules/ cm^3 (en temps calme, c'est environ 5) ; la vitesse du vent solaire dépasse 700 km/s (environ 350 en période calme) ; le champ magnétique interplanétaire à une intensité de 60 nT (environ 5 en période calme) et surtout la composante nord-sud (ou Z, en rouge sur le graphique) très fortement négative. Cette valeur négative

est une condition nécessaire pour qu'il y ait une entrée massive de particules dans la magnétosphère terrestre via le processus de reconnexion magnétique (voir les numéros 141 et 142 des *Cahiers Clairaut*).

À 17 h 06 TU (soit 32 minutes après l'arrivée de la CME au niveau de Dscovr) : les magnétomètres au sol mesurent la variation du champ magnétique due à la compression de la magnétosphère. La compression de la magnétosphère provoque d'abord une intensification du courant circulant le long de la magnétopause puis une intensification du courant électrique annulaire qui circule d'est en ouest dans le plan de l'équateur magnétique terrestre (voir article de Gaël Cessateur dans ce numéro). Une augmentation de l'intensité du courant annulaire crée un champ magnétique dirigé vers le sud entre le courant et la Terre ; ceci est observé comme une baisse de la composante sud-nord du champ magnétique mesuré au niveau du sol. L'indice Dst (panneau du bas de la Figure 1) montre cette baisse après l'arrivée de la CME. C'est la phase d'orage magnétique qui dure typiquement quelques jours. Expliquons en quelques mots ce qu'est l'indice Dst. Au lieu de mesurer le champ magnétique au sol partout sur Terre, on le mesure à quelques stations de référence de part et d'autre de l'équateur magnétique et on fait une moyenne qui donne l'indice magnétique Dst (pour *disturbance storm time* soit « perturbation en temps d'orage »). En temps géophysiquement parfaitement calme, cet indice vaut 0. Pour une déviation jusqu'à -50 nT, on parlera d'orage faible ; entre -100 et -50 nT, d'orage modéré ; entre -200 et -100 nT, d'orage fort ; -350 et -200 nT, d'orage sévère ; et plus bas que -350 nT, de super orage. Le 11 mai 2024 autour de 3 h TU, le Dst a atteint la valeur de -412 nT. C'est colossal. La dernière valeur aussi grande (en valeur absolue) c'était en novembre 2003 pendant les orages dits d'Halloween (voir l'activité du Soleil à la Terre du hors-série 14 des *Cahiers Clairaut*). L'indice Dst avait alors atteint -422 nT. Lors de l'orage géomagnétique de mars 1989, qui avait provoqué une immense panne de courant au Québec, le Dst avait atteint -589 nT. Pour l'événement de Carrington qui a eu lieu en 1859, certaines estimations le situent à -1750 nT !

Quels effets ?

Les « humeurs » de notre étoile sont surveillées de près par les scientifiques qui cherchent à prévoir les événements solaires et comprendre leurs effets sur l'environnement spatial terrestre, mais aussi par des utilisateurs pour qui l'activité solaire peut poser des problèmes d'électronique à bord des satellites artificiels, de navigation (signaux GNSS dégradés pendant les orages magnétiques), de distribution d'électricité (les variations magnétiques

mesurées au sol produisent des courants électriques par induction), etc. En France, ces préoccupations relèvent de l'Organisation française pour la recherche applicative en météorologie de l'espace (Oframe).

Les effets les plus spectaculaires sont évidemment les aurores polaires qui ont été vues à des latitudes inhabituellement basses car les ovales auroraux se sont élargis et sont donc descendus à plus basses latitudes qu'à l'accoutumé. En Europe, on a vu des aurores jusqu'en Espagne ; il semble que des lueurs rouges aient été aperçues à l'horizon sud de La Réunion ; en Amérique elles sont descendues suffisamment bas en altitude pour être visible du Mexique. Il faut préciser que l'Amérique du Nord est privilégiée car le pôle géomagnétique se trouve au Nord du Canada, donc à latitude géographique équivalente à l'Europe par exemple, la latitude géomagnétique est sensiblement plus haute en Amérique du Nord. Par exemple, Toulouse et Toronto sont à peu près à la même latitude géographique (43,6° pour la ville rose, 43,7° pour la capitale de l'Ontario) mais pas du tout à la même latitude géomagnétique : 38,1° pour Toulouse et 52,5° pour Toronto. Ça fait toute la différence pour y voir des aurores.

En ce qui concerne les effets technologiques, au moment où nous écrivons ces lignes, l'événement est encore récent et peu d'informations ont filtré. On peut tout de même lire et entendre dans la presse que les communications avec des satellites ont été perturbées et que les opérateurs de réseaux électriques des pays nordiques ont eu du pain sur la planche. A priori, malgré l'intensité de l'orage, il semble que les choses se soient bien passées. Sans doute les opérateurs de satellites et de distribution électrique ont-ils appris des orages d'Halloween en 2003 qui avaient causé de nombreux dégâts.

Quelques ressources :

Site de l'Oframe :

<http://www.meteo-espace.fr/meteo-espace/fr>

Cahiers Clairaut n^{os} 141, 142, 180

HS14 « Le Soleil ».



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

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

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