Les Cahiers Clairaut

Hiver 2022-2023

Éditorial

L'explication du mécanisme de l'alternance des jours et des nuits constitua longtemps une profonde énigme pour les hommes. Pourquoi le Soleil parcourt-il le ciel toujours dans le même sens ? Dans l'Antiquité le Soleil est pour les Égyptiens le dieu Rê (un homme à tête de faucon) qui la nuit se déplace à bord d'une « barque solaire » et renaît chaque matin.

Pour les Grecs c'est le dieu Hélios qui conduit un « char solaire » tiré par des chevaux ailés.

Plus tard au XVIIe siècle le Soleil fut « confisqué » par Louis XIV incarnant lui-même sur la Terre l'astre du jour ; il eut cependant la bonne idée de créer en 1667 l'Observatoire de Paris.

Au XVIIIe siècle, faute de comprendre sa nature, les hommes se contentèrent de louer ses bienfaits. C'est ainsi que Baudelaire publie un poème intitulé « Le Soleil » dans les *Fleurs du mal* (1857). Il décrit un Soleil qui brille pour tous et qui ennoblit les « choses les plus viles ».

Au XIXe siècle Auguste Comte écrit dans son *Cours de philosophie positive* que l'on ne connaîtra jamais la composition du Soleil car il est beaucoup trop loin et beaucoup trop chaud. L'essor de la spectroscopie viendra démentir cette prophétie et Jules Janssen en 1868 découvrira dans le Soleil un corps inconnu sur Terre qui fut appelé hélium.

Où en est-on actuellement ?

Nous vous invitons dans ce numéro à découvrir les progrès très récents obtenus grâce aux sondes spatiales comme SoHo, Solar Orbiter et Parker Solar Probe, ces deux dernières venant régulièrement frôler notre étoile.

Christian Larcher pour l'équipe de rédaction

Sommaire

Actualités

Brèves d'observatoires et autres nouvelles
Frédéric Pitout p 2

Curiosité

Couleurs de la Lune
Professeur Louphoque et Jean (I need space) p 6

Dossier : le Soleil p 9

Article de fond

La couronne solaire et la météorologie de l'espace
Karl-Ludwig Klein p 10

Exposition « Face au soleil. Un astre dans les arts » p 14

Construction

Réalisation d'un télescope pour l'imagerie solaire
Roger Meunier p 15

Article de fond

La mission Solar Orbiter, premiers résultats
Milan Maksimovic p 19

Histoire

Quelques éruptions solaires passées
Chantal et Georges Lecoutre p 24

Le Soleil dans les Cahiers Clairaut et mots croisés
Pierre Causeret p 28

Avec nos élèves

On a adopté un Sol'Ex
Jean-Baptiste Butet et ses élèves p 29

Curiosité

Tableaux de Monet et de Derain
Christian Larcher, Pierre Causeret p 34

Observation

Le ciel de l'hiver 2022-2023
Pierre Causeret p 37

Avec nos élèves

Mesurer Saturne
Pierre Causeret p 38

Cartes et légendes des 88 constellations p 39

Avec nos élèves

Spectre d'une étoile, détermination de son rayon
Bertrand Stortz p 40

Solution mots croisés p 44

Lecture pour la marquise

Recension : Une histoire de la lumière
Daniel Descout p 45

Assemblée générale du CLEA p 46

Le CLEA agit

Formation en astronomie dans l'académie de Nice
Ghislain Bernard p 47

BRÈVES D'OBSERVATOIRES ET AUTRES NOUVELLES

Frédéric Pitout, IRAP Toulouse

Le sursaut gamma le plus puissant jamais enregistré

Le 9 octobre 2022, vers 15 h (heure de Paris), un sursaut de rayonnement gamma, nommé GRB 20221009A, provenant de la constellation de la Flèche a été détecté. Ces sursauts, associés à des événements cataclysmiques comme l'effondrement d'étoiles très massives qui mène à la formation d'un trou noir stellaire, sont relativement fréquents mais celui-ci a intrigué par sa luminosité (évaluée à celle d'un milliard de milliards de Soleil), sa durée (plusieurs secondes) et par l'énergie des photons détectés : 18 TeV. Un record pour un tel événement. Autre particularité, il provient d'un endroit relativement proche puisque la galaxie où l'événement s'est produit n'est « qu'à » 1,9 milliard d'années-lumière de nous.

Malgré la relative proximité (habituellement, les sursauts gamma longs observés proviennent de distances plus grandes, autour de 10 milliards d'années-lumière), des photons aussi énergétiques devraient être absorbés en chemin dans le milieu interstellaire. En d'autres termes, observer un photon de 18 TeV venant d'une source si distante est a priori très peu probable. Donc soit on ne maîtrise pas totalement la physique de la propagation de photons aussi énergétiques, soit la luminosité de l'événement est absolument colossale !

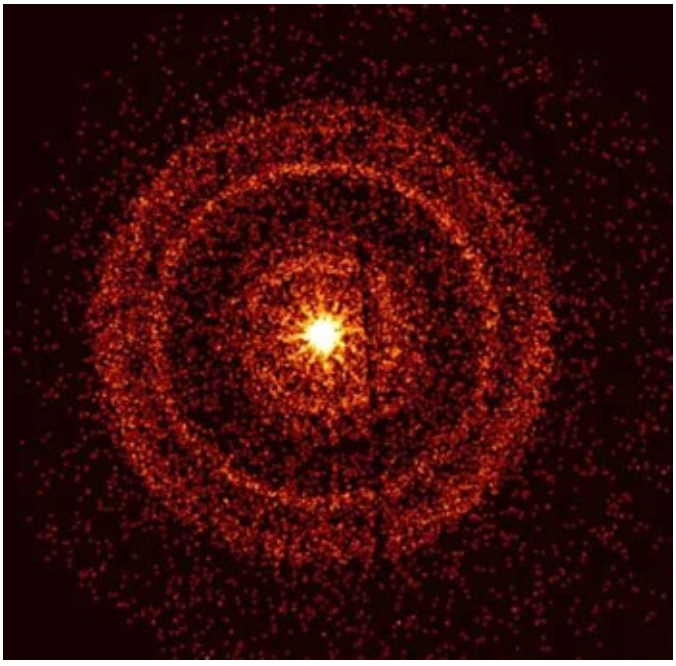


Fig.1. **Image du sursaut gamma GRB 20221009A prise par le satellite Swift dans le domaine X. Les anneaux visibles sont dus à l'excitation du milieu interstellaire soumis aux rayonnements ionisants X et γ. (Nasa).**

Autre détail étonnant et rarissime : ce sursaut, via ses émissions X et gamma, a modifié la haute atmosphère terrestre en ionisant la couche entre 60 et 90 km. Cette couche, appelée région D de l'ionosphère, joue un rôle particulier dans la propagation et la réflexion des ondes radioélectriques. De fait, des communications ont été perturbées. Comme quoi, le Soleil n'est pas l'unique astre perturbateur de notre environnement spatial.

https://lejournal.cnrs.fr/articles/un-cataclysme-cosmique-exceptionnel

Télescope spatial James Webb : la calibration de NIRCam en question

Tous les instruments doivent être convenablement calibrés avant utilisation, c'est ce que l'on enseigne dans toutes les écoles et universités. Ce principe de base n'a apparemment pas été suivi à la lettre pour la caméra sensible au domaine du proche infrarouge NIRCam, à bord du télescope spatial James Webb. Dans une note du 23 juin 2022, l'équipe de NIRCam prévoyait de pointer le télescope vers des cibles connues, comme l'amas globulaire M92, pour calibrer les différents détecteurs de la caméra. Or les scientifiques, tout pressés qu'ils étaient, n'ont pas attendu et ont soumis pour publications dans des revues scientifiques des résultats qui s'appuyaient sur des données mal calibrées. Et un instrument mal calibré donne des mesures biaisées, voire fausses.

Ces mêmes revues ont fort logiquement refusé les manuscrits. Par conséquent, des chercheurs qui sont allés un peu vite en besogne ont dû revoir leurs résultats et conclusions, notamment pour des objets lointains et de très faibles éclats. Comme dit l'adage, il ne faut pas confondre vitesse et précipitation !

https://www.numerama.com/sciences/1138574-des-scientifiques-exaltes-par-james-webb-se-sont-un-peu-emballes-avec-ses-donnees.html

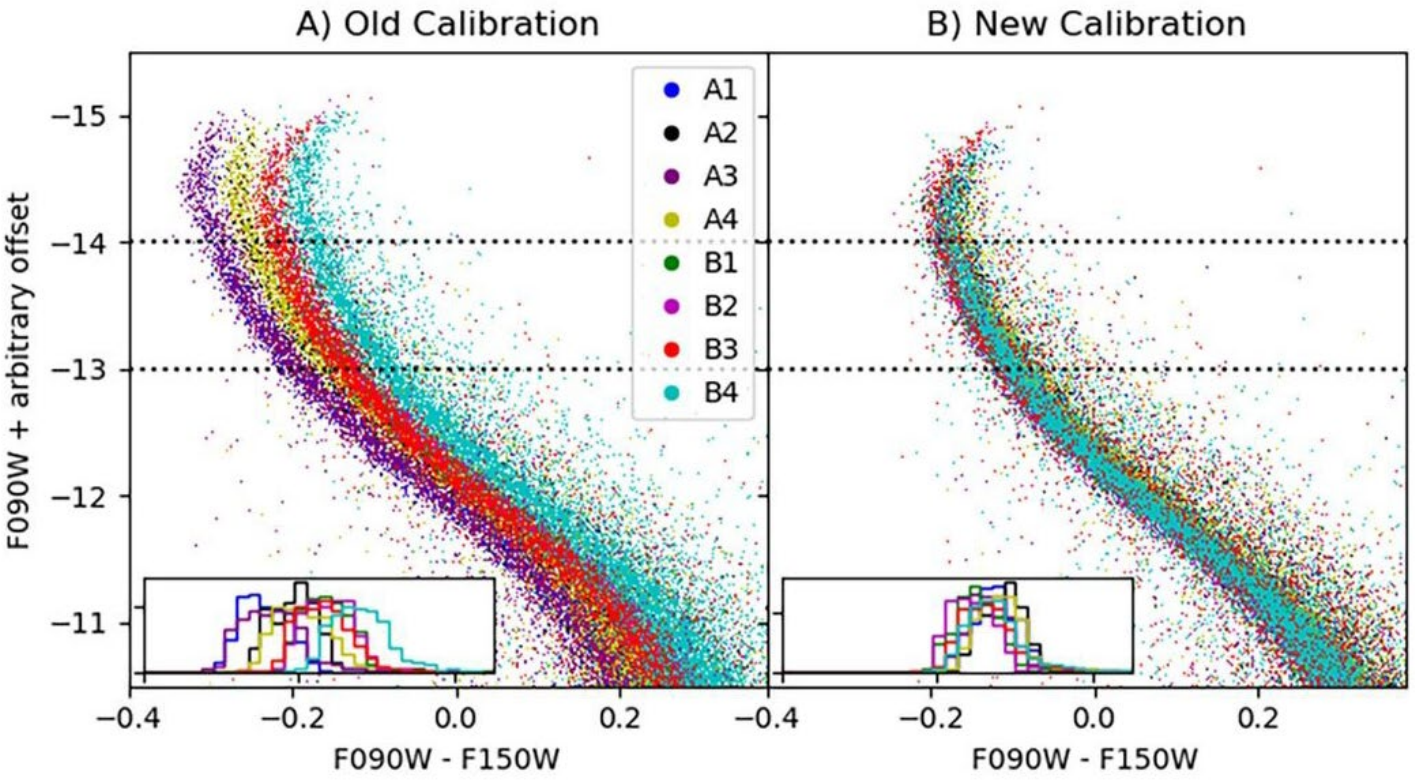


Fig.2. **Courbes de calibrations avant (à gauche) et après (à droite) des travaux menés pendant l'été 2022. Est affichée sur chaque graphique l'intensité lumineuse des étoiles de M92 à travers un filtre (F090W) en fonction de la différence d'intensité lumineuse entre les filtres F090W et F150W. Ces figures ne sont donc ni plus ni moins que des diagramme couleur-magnitude (diagrammes HR) dans l'infrarouge proche. À droite, les courbes se superposent bien, indiquant une calibration nettement améliorée. (D'après Boyer at al., RNAAS, 2022).**

Dart, la fléchette spatiale qui a mis dans le mille

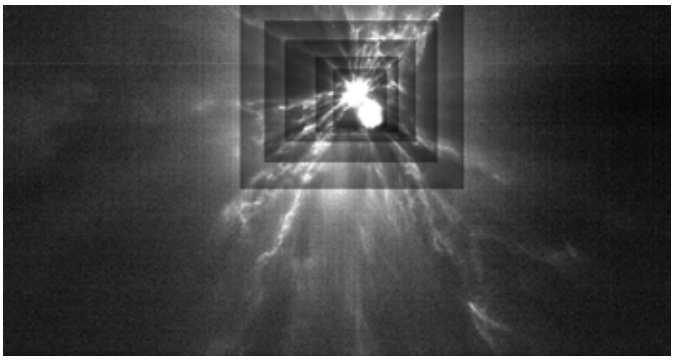


Fig.3. **Image des éjectas de matière pendant l'impact de Dart sur l'astéroïde Dimorphos réalisée le 27/09/2022 par le cubesat italien LiciaCube que Dart embarquait et qu'elle a lâché 10 jours avant l'impact. (Crédits : ASI/Nasa/APL).**

La sonde spatiale *Double Asteroid Redirection Test* (DART en anglais, qui signifie fléchette), soit test de redirection d'un astéroïde double, s'est écrasé sur Dimorphos, le petit satellite de l'astéroïde Didymos, le 26 septembre 2022 à quelque 11 millions de km de la Terre. Le but était de dévier la trajectoire de Dimorphos et d'en modifier l'orbite autour de Didymos. L'objectif était double : étudier les collisions de petits corps célestes et leurs conséquences physiques et dynamiques, mais aussi envisager la déviation d'un possible astéroïde qui menacerait la Terre. Le petit satellite rocheux se trouve maintenant sur une orbite plus interne autour de Didymos mais la déviation de son orbite a été plus importante que prévue. L'étape suivante sera assurée par la sonde européenne Hera qui ira explorer *in situ* les conséquences de l'impact. Hera transportera deux cubesats – des nanosatellites de quelques dizaines de cm de côté – qui feront des mesures au plus près du couple d'astéroïdes. Il est prévu que l'un d'entre eux se pose à la surface de Dimorphos. Rendez-vous fin 2026.

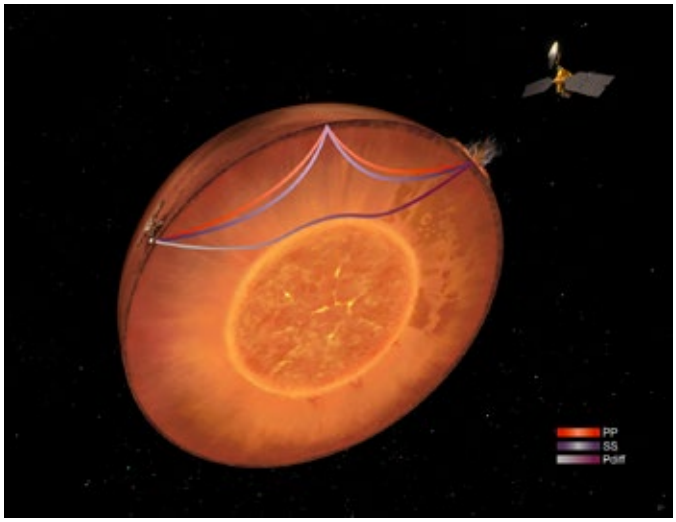


Fig.4. **Représentation de l'impact de météorite du 18 septembre 2021 observé par le satellite de la mission Mars Reconnaissance Orbiter et de la propagation, au sein du manteau et jusqu'à l'interface manteau/noyau de la planète Mars, des différents types d'onde détectés par le sismomètre SEIS de la mission InSight. (IPGP, Cnes, N. Starter).**

https://spacegate.cnes.fr/fr/dart-la-deviation-de-lasteroide-dimorphos-est-un-succes

Les systèmes globaux de navigation par satellites (GNSS) fonctionnent sur la Lune !

Les signaux radio émis par les satellites des différents systèmes de navigation (comme le GPS étatsunien ou le Galileo européen) sont dirigés principalement vers la Terre mais une partie s'échappe dans l'espace. Il est donc possible, en principe, de localiser un engin spatial pourvu d'un récepteur, même si cet engin est à plus grande distance de la Terre que les satellites émetteurs. Ceci a déjà été validé avec les sondes scientifiques *Magnetospheric MultiScale* (MMS) qui étudient les couplages entre le vent solaire et la magnétosphère terrestre. Pourrait-on se localiser sur le Lune à l'aide des GNSS ? Même si, dans ce cas, le signal reçu des satellites émetteurs serait nettement plus faible et que la géométrie de réception serait moins favorable, ce qui entraînerait une précision de positionnement de 100 à 1 000 fois moins bonne que sur Terre, la réponse est oui ! La Nasa travaille sur des récepteurs plus sensibles et des émetteurs plus puissants pour que les futurs astronautes qui fouleront le régolithe lunaire puissent se localiser.

https://substance.etsmtl.ca/utiliser-gnss-espace-defis

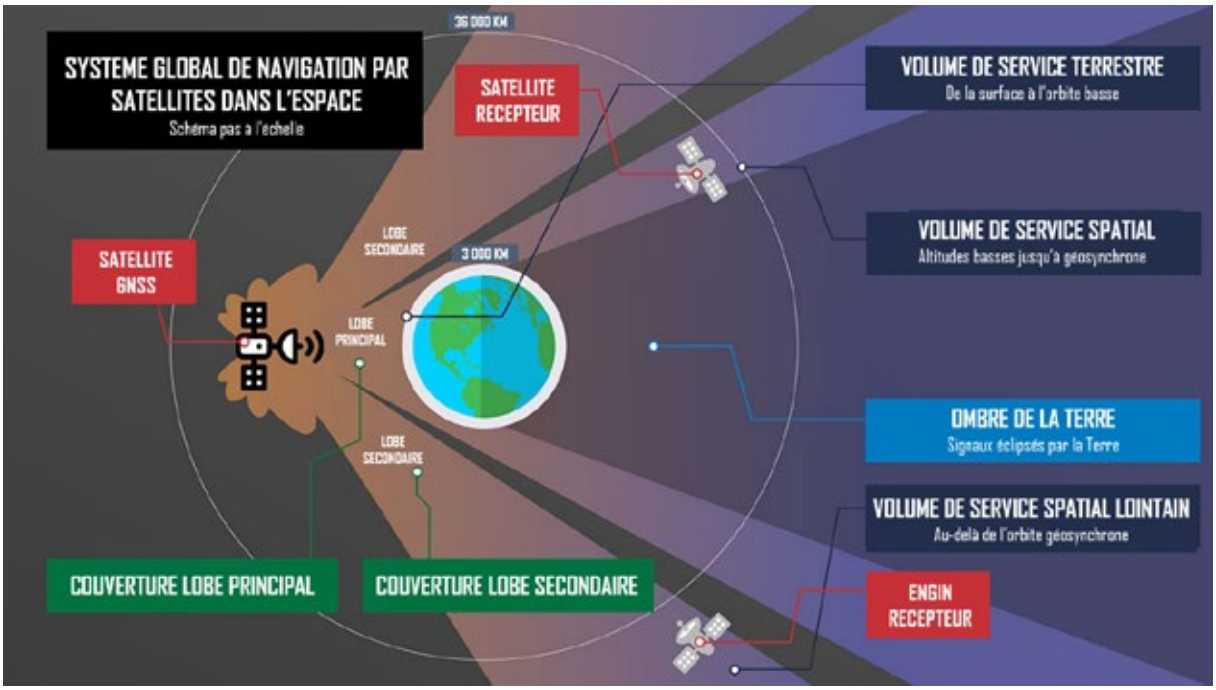


Fig.5. **Schéma (pas à l'échelle) montrant les lobes d'émission principal et secondaire d'un satellite émetteur GNSS ainsi que les différentes régions considérées en fonction de la distance à la Terre. (Nasa, traduction Clea).**

AstroTube, la chaîne de l'Observatoire de Paris

L'Observatoire de Paris propose des centaines de capsules vidéos sur un site hébergé par la plateforme PeerTube nommé Astrotube. Des séquences réalisées par les différentes composantes de l'Observatoire de Paris y sont accessibles. Elles portent sur la physique, l'astronomie, les mathématiques, etc. Des soutenances de thèses et des entrevues avec des scientifiques sont aussi proposées. En lien avec le dossier de ce numéro, on trouvera les 26 vidéos du Mooc *Soleil !*

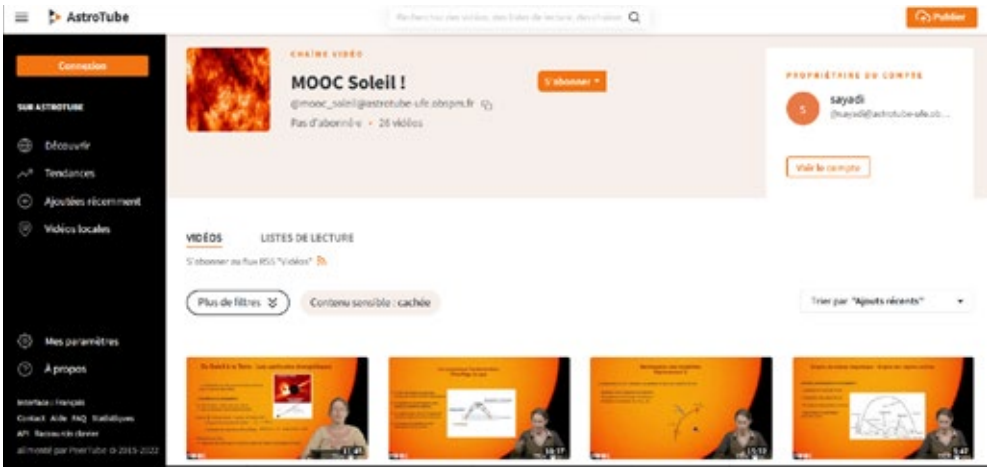


Fig.6. **Copie d'écran de la page dédiée au Mooc Soleil ! sur AstroTube.**

https://astrotube.obspm.fr/

« L'astronomie en classe » sur Eduscol

Le site Web d'Eduscol a eu droit à un toilettage d'automne et plusieurs ressources liées à l'astronomie sont listées dans la page intitulée « L'astronomie en classe ». Elles proviennent de La main à la pâte, de quelques observatoires, de la Cité de l'espace, etc. Curieusement, aucune ressource du Clea n'y est présente… Un petit mot a été transmis pour suggérer d'en intégrer.

https://eduscol.education.fr/3019/l-astronomie-en-classe



Fig.7. **Copie d'écran de la page du site Eduscol dédiée à l'astronomie en classe.**

Plateforme ouverte du patrimoine

Les amateurs d'histoire de l'astronomie pourront trouver sur la plateforme ouverte du patrimoine (POP) du ministère de la Culture les trésors astronomiques de leur région en faisant une recherche par domaine (astronomie), par région, par période, etc. Ou comment découvrir des trésors méconnus en quelques clics.

https://www.pop.culture.gouv.fr/



Fig.8. **Copie d'écran du site POP suite à une recherche dans le domaine de l'astronomie.**

Séminaire d'histoire des sciences astronomiques

Le Syrte, composante de l'Observatoire de Paris, organise à la fréquence d'un ou deux par mois des séminaires d'histoire de l'astronomie, en français ou en anglais, qui sont retransmis en ligne en direct. Le programme des prochains séminaires ainsi que les enregistrements de ceux passés sont disponibles sur la page dédiée.

https://syrte.obspm.fr/spip/science/histoire/seminaires-et-colloques/seminaire-d-histoire-des-sciences-astronomiques/



Fig.9. **TPage d'accueil des séminaires d'histoire des sciences astronomique, hébergée par le site Web su Syrte.**

■

COULEURS DE LA LUNE

Professeur Louphoque et Jean (I need space)

Sur les réseaux sociaux ou dans la presse, vous avez sûrement entendu parler de la Lune sous des termes très colorés : lune rousse, lune de sang, lune bleue… Mais qu'en est-il exactement ? Face aux interrogations des élèves (et aussi de beaucoup d'adultes), revenons sur les différentes couleurs de la Lune.

Tout d'abord il convient de se demander quelle est sa couleur propre ?
Évidemment, comme sur Terre, la couleur change localement, et de plus chaque astronaute en a une vision subjective. Gris souris, gris béton, brune ou orange, comme le dit Mickael Light, le photographe qui a travaillé sur les photographies des missions Apollo : « Demandez aux 12 astronautes qui ont marché sur la Lune quelle est sa couleur, et vous aurez 12 réponses différentes »[1].

Le sol de la Lune se compose majoritairement de 2 types de roches :
- les basaltes sombres qui constituent les mers lunaires (figure 1) ;
- les feldspaths plus clairs qui constituent les continents lunaires (figure 2).



Fig.1. **Échantillon lunaire n° 10020 composé principalement de basalte (crédit NASA).**

Si les missions Apollo nous ont habitués aux teintes claires des continents, la face visible de la Lune est globalement très sombre. Aussi sombre qu'une route ! Le grand astrophysicien André Brahic disait d'ailleurs à ses étudiants que si on peignait la Lune en noir son éclat serait plus intense !

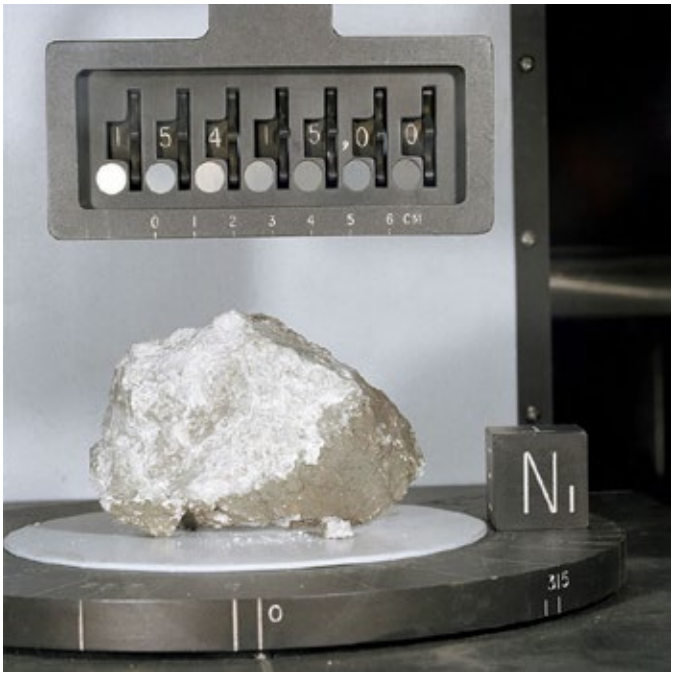


Fig.2. **Échantillon d'anorthosite ramené par la mission Apollo 15 composé principalement de feldspath (crédit NASA).**

En effet, son albédo, c'est-à-dire son pouvoir réfléchissant n'est que de 8 %. Non seulement elle est sombre mais en plus elle est recouverte d'une poussière fine, le régolithe qui renvoie très mal la lumière. Si on la couvrait de peinture noire, elle serait plus lisse, donc plus brillante ! Les peintures noires du commerce ont un albédo d'environ 10 %.



Fig.3. **Pleine Lune (wikipedia/G. H. Revera).**

1 Sur https://history.nasa.gov/alsj/apollocolor.html :
Mike replied (16 December 2000):
Color on the moon, as you know, is a very subjective phenonmenon; it is also quite variable in terms of actual physical phenomena, ie, the color changes depending on the angle of the sun and one's orientation to it. 'Mouse grey,' 'mouse brown,' 'concrete,' 'asphalt,' etc. – ask the 12 moonwalkers what the color of the moon is and you'll get 12 different answers.

Mais pourquoi la voit-on blanche alors ? Parce que la Lune est éclairée par le Soleil dont elle renvoie la lumière (c'est d'ailleurs une preuve que la lumière du Soleil est blanche).
Vous pouvez en faire l'expérience facilement, en regardant la couleur d'une route en fonction de l'incidence du Soleil, ou en éclairant une feuille noire à l'aide d'une lampe blanche (torche de smartphone par exemple). Pensez également à l'outre-noir de Soulage.



Fig.4. La route apparaît noire devant et claire dans le rétroviseur.



Fig.5. La feuille noire apparaît blanche là où l'éclairage est le plus intense.

La couleur de la Lune peut changer en fonction de la lumière qui nous arrive du Soleil.
C'est le cas de **la lune cuivrée.** Ce phénomène est facilement observable aux alentours de la pleine Lune, quand celle-ci est basse sur l'horizon. La lumière du Soleil se teinte en traversant l'atmosphère et va donner à la Lune une couleur jaune-orangée.
Très rarement, la présence d'humidité ou de cristaux de glace dans l'atmosphère peut conférer à une lune cuivrée une teinte pourpre, semblable à celle des nuages lors d'un coucher de Soleil.

Plus impressionnant encore, lors d'une éclipse de Lune, seule la lumière du Soleil ayant traversé l'atmosphère est capable d'éclairer la Lune. Celle-ci se teinte alors de rouge, ce que les anglo-saxons appellent **la blood moon,** que l'on peut traduire par lune de sang. Mais ce terme n'est pas reconnu en France.

Enfin, le phénomène de rayon vert est observable avec la Lune si les conditions sont réunies.

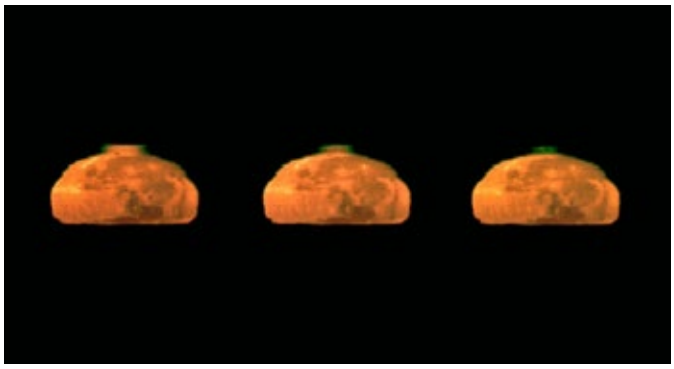


Fig.6. Lune et rayon vert observé au VLT à 2 600 mètres d'altitude dans le désert d'Atacama au Chili (crédit ESO/G.Hüdepohl).

Et c'est tout ! Tous les autres termes « colorés » quand on parle de la Lune n'ont aucune réalité astronomique. Voyons ensemble les plus fréquents.

La lune rousse : c'est un terme d'agriculture qui désigne la période après Pâques où, quand la nuit est claire, les jeunes plantes peuvent mourir d'une gelée nocturne tardive qui leur donne une teinte roussie.

La lune rose, la lune des fleurs, la lune des fraises, la lune des glaces etc.
Tous ces termes fantaisistes sont issus du folklore amérindien. Les indiens d'Amérique mesuraient le temps à l'aide des cycles lunaires, ils avaient donc donné un nom à chaque pleine Lune de l'année, tout comme nous avons nommé les mois de l'année. Ces noms varient d'ailleurs en fonction des tribus ou des zones géographiques. Ces termes poétiques ont été démocratisés dans l'almanach des fermiers américains : « the old farmer's almanac » puis repris par les astrologues et les médias. Ces noms n'ont aucun rapport avec la couleur de la Lune ni avec l'astronomie et sont souvent utilisés comme « piège à clic » afin de susciter le buzz (figure 7).



Fig.7. **Noms traditionnels de la pleine Lune tirés du « Old Farmers's almanac » (Credit Colleen Quinnell).**

La lune bleue : pas du tout bleue, ce terme provient d'un proverbe anglo-saxon « once in a blue moon », que nous pourrions traduire par « tous les trente-six » du mois. Une lunaison durant 29,5 jours, il arrive mécaniquement certaines années qu'il y ait 2 pleines lunes le même mois calendaire (de 30,4 jours en moyenne). Dans ce cas la 2e pleine Lune du mois est surnommée « lune bleue », mais là encore, aucun rapport ni avec l'astronomie ni avec la couleur de notre satellite.

La lune noire : ce terme n'a aucune valeur en astronomie. Il peut d'ailleurs avoir plusieurs significations.
Dans le langage populaire, il peut simplement désigner une nouvelle Lune. Il s'agit du moment où la face de la Lune visible depuis la Terre n'est pas du tout éclairée par le Soleil.
Tout comme le terme « lune bleue » il est très rarement employé pour désigner une bizarrerie du calendrier, comme l'absence de pleine Lune durant le mois de février ou la présence de 2 nouvelles lunes le même mois.
En astrologie la lune noire désigne une hypothétique « deuxième Lune » appelée Lilith qui serait située dans une position particulière de l'orbite lunaire.

La lune verte : c'est « un fake », un photomontage relayé par les réseaux sociaux dans le but de générer du trafic… et donc des revenus[2].

Vous l'aurez compris, la plupart des termes employés pour désigner la Lune sont bien éloignés de la réalité astronomique. Tout comme le terme de « superlune » il s'agit de surnoms ou de termes accrocheurs qui seront, malheureusement, repris en boucle dans les médias.

À retouver en vidéo sur https://t.co/iQmCLU5IJw

■

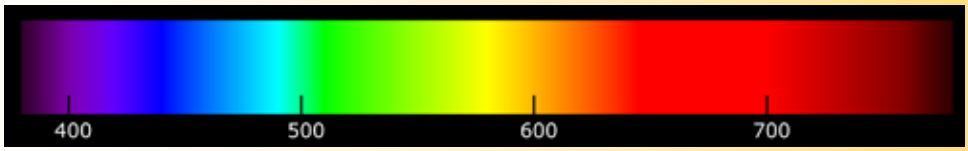
2 https://www.francetvinfo.fr/replay-radio/le-vrai-du-faux-numerique/non-la-lune-ne-sera-pas-verte-a-la-fin-du-mois_1780265.html

Dossier

LE SOLEIL

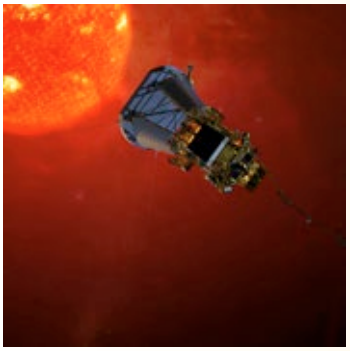
Le dossier de ce numéro aborde à nouveau le Soleil, un sujet d'actualité avec les sondes Solar Probe et Solar Orbiter. Voici un petit questionnaire pour tester vos connaissances sur notre étoile.

Q1. La lumière qui nous parvient du Soleil est blanche, c'est la « couleur » à laquelle notre œil s'est adapté. Mais savez-vous dans quelle longueur d'onde le Soleil émet le plus ?
A. 480 nm (bleu) ; B. 530 nm (vert) ; C. 580 nm (jaune) ; D. 615 nm (orange)
Pour vous aider, voici une correspondance couleur – longueur d'onde

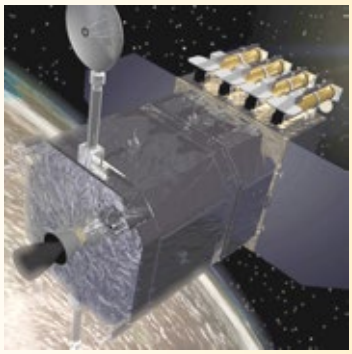


Q2. Quelle est la température du Soleil ? Tout dépend où on la mesure (ou calcule). Voici 4 températures et 4 sites. Associez chacun des 4 sites à sa température.
A. Coeur ; B. Tache solaire ; C. Photosphère (surface) ; D. Couronne
1. 3 500 °C ; 2. 5 500 °C ; 3. 1 000 000 °C ; 4. 15 000 000 °C.

Q3. Les photos ci-dessous représentent quatre satellites ou sondes d'observation du Soleil. Sauriez-vous les classer par ordre chronologique de lancement ?



A. Parker Solar Probe



B. SDO (Solar Dynamic Observatory)



C. SoHo (Solar and Heliospheric Observatory)



D. Solar Orbiter

Q4. Entre la Terre et le Soleil, combien de fois pourrait-on placer approximativement le Soleil ? la Terre ? la Lune ?

Solutions :

Q1. Réponse B. Eh oui, c'est dans le vert...

Q2. A4 – B1 – C2 – D3.

Q3. 1C (lancé le 2 décembre 1995). SoHO (NASA, ESA) 1,8 tonne, un miraculé (perdu en 1998 puis retrouvé au bout de 3,5 mois), orbite autour du point de Lagrange L1. Prévue pour durer 4 ans, sa mission a été prolongée jusqu'en 2022 voire 2025. Objectif principal : étude de la structure interne du Soleil. Embarque 12 instruments.

2B (lancé le 11 février 2010). SDO, plus de 3 tonnes, orbite géosynchrone, altitude moyenne 35 756 km. Étudie les variations dans l'activité du Soleil. Embarque 3 instruments dont la caméra AIA imageant dans 10 longueurs d'onde. Durée de vie 10 ans. Toujours en activité.

3A (lancé le 12 août 2018). Parker Solar Probe (NASA), 685 kg, étudie la région inexplorée de l'espace située à moins de 0,3 ua du Soleil. Doit effectuer 24 passages à moins de 0,17 ua dont trois à moins de 0,045 ua. Sera aussi la première sonde à étudier le vent solaire in situ grâce à 4 ensembles instrumentaux protégés par un important bouclier. Doit recueillir des données de 2018 à 2025.

4D (lancé le 10 février 2020). Solar Orbiter (ESA), 1,6 tonne, atteindra son orbite de travail autour du Soleil en 2023. Objectif : étude des processus à l'origine du vent solaire, du champ magnétique héliosphérique, des particules solaires énergétiques, des perturbations interplanétaires transitoires ainsi que du champ magnétique du Soleil. Il emporte 10 instruments. La mission doit durer 7 à 10 ans. Les missions Parker Solar Probe et Solar Orbiter sont coordonnées dans le cadre du programme commun HELEX (Heliophysical Explorers).

Q4. Un peu plus de 100 soleils, de 10 000 terres et 40 000 lunes...

LA COURONNE SOLAIRE ET LA MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE

Karl-Ludwig Klein, Observatoire de Paris, LESIA et Observatoire radio-astronomique de Nançay, Universités Paris Sciences & Lettres, Paris Cité, Sorbonne Université, Université d'Orléans

Le Soleil est un objet astrophysique proche qui nous permet d'étudier en détail des processus qui ont lieu ailleurs dans l'Univers comme la génération des champs magnétiques, le transport et la génération d'énergie, l'accélération de particules chargées à de hautes énergies. La couronne solaire, couche externe visible à l'œil lors d'une éclipse totale, est un gaz ionisé structuré par le champ magnétique. Elle se révèle fortement variable sur des échelles qui vont de quelques secondes lors d'une éruption solaire à plusieurs années, notamment le cycle solaire d'environ 11 ans. Au travers des rayonnements X, EUV et radio, des éjections de masse et jets de particules de haute énergie, la couronne affecte la technologie humaine basée sur l'espace et les communications par ondes hertziennes, mais aussi le transport d'énergie dans les régions de haute latitude. Cet article donne un aperçu de la physique de la couronne et de quelques implications sur l'environnement spatial de la Terre, qu'on étudie au sein de la météorologie de l'espace.

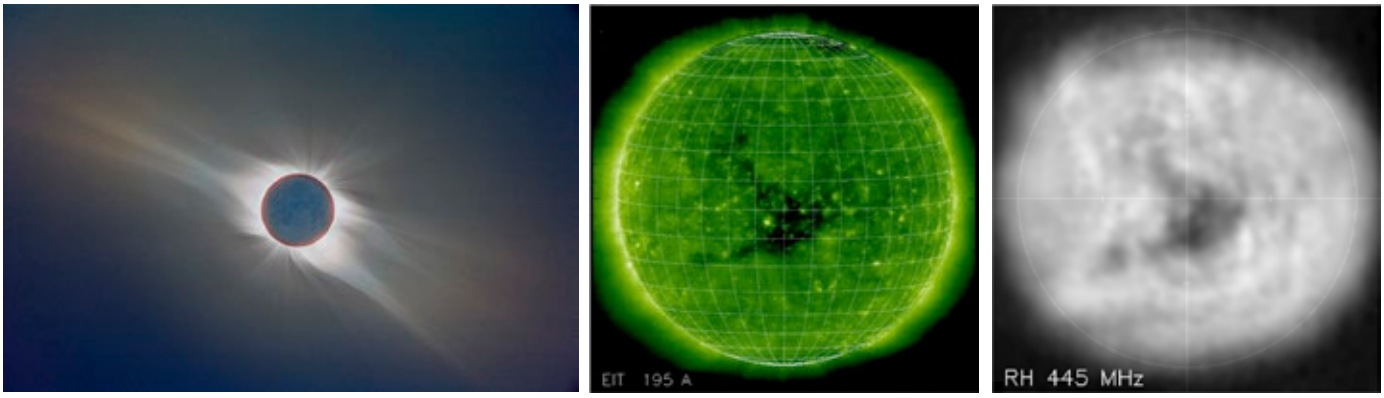


Fig.1. **Trois vues de la couronne solaire, en lumière visible lors d'une éclipse solaire totale à gauche (crédit C. Viladrich), en ultraviolet extrême (EUV) au centre (λ = 19,5 nm ; SoHO/EIT, crédit ESA/NASA) et en ondes radio à droite (λ = 67 cm ; NRH, crédit C. Mercier, Obs. Paris).**

La couronne solaire

La couronne solaire que nous voyons à l'œil lors d'une éclipse totale du Soleil (cliché à gauche de la figure 1) est un gaz qui entoure la photosphère visible. Il est très dilué (la densité à la base de la couronne est comparable à celle de l'atmosphère terrestre à 400 km d'altitude) et de ce fait visible seulement quand la photosphère est occultée. Ce gaz est très chaud, à quelques millions de degrés, bien plus que la photosphère et ses 5 800 K. Ce fait intrigant est connu sous le nom du problème de chauffage de la couronne. La forte pression qui résulte de cette haute température pousse la couronne dans l'espace interplanétaire. Un flot continu de protons, électrons, noyaux et ions d'hélium, le vent solaire, est détecté au voisinage de la Terre avec une concentration d'une dizaine de particules par cm^3 et une vitesse de 300 à 800 km/s.

Un fait remarquable dans la figure 1 est que, contrairement à la photosphère, la couronne n'est pas ronde. Sa forme montre que la gravitation n'est pas la seule force à l'œuvre. La brillance des différentes régions reflète la densité des électrons intégrée le long de la ligne de visée. Ces électrons sont confinés dans certaines régions, les « grands jets », qui s'étendent vers le haut à gauche et le bas à droite de l'image d'éclipse, et s'échappent librement notamment des « trous coronaux » visibles dans la direction orthogonale aux grands jets. La force à l'œuvre est magnétique.

La haute température fait que la couronne émet en UV extrême (EUV, image centrale de la figure 1) et en rayons X. Elle émet aussi des ondes radio (image de droite). Ces trois domaines du spectre électromagnétique nous donnent une vue plus complète de la couronne. On voit notamment en EUV et dans le domaine radio une région sombre sur le disque solaire. C'est un trou coronal similaire aux structures au-dessus du limbe du Soleil en lumière visible.

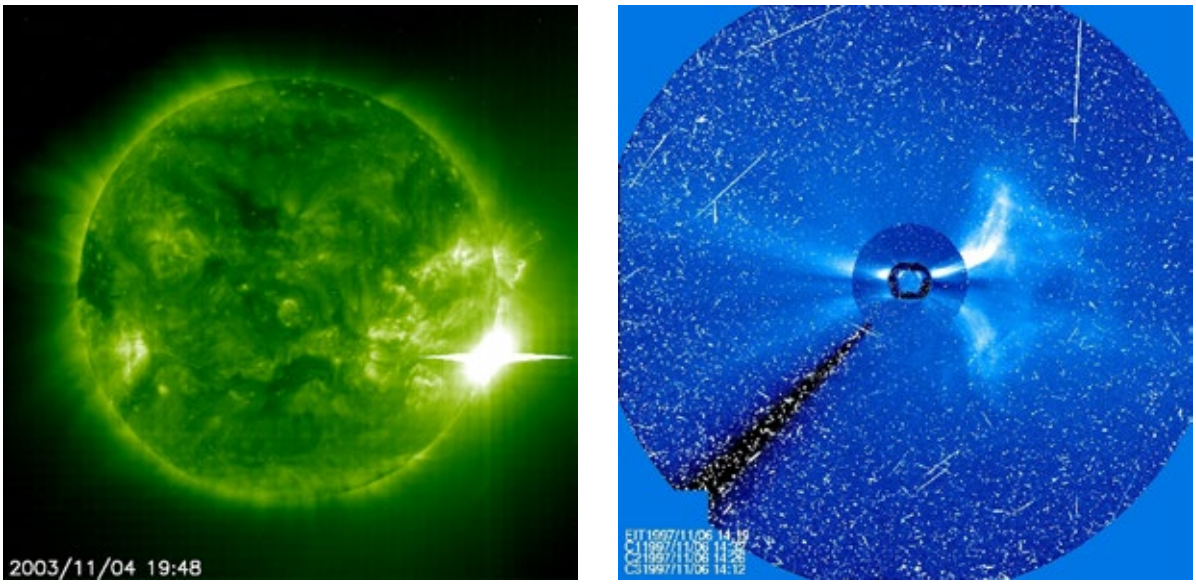


Fig.2. **Observations d'une éruption solaire en extrême ultraviolet (image de gauche ; SoHO/EIT) et d'une éjection coronale de masse (à droite ; SoHO/EIT et LASCO). Crédit ESA/NASA.**

Le champ magnétique connecte la couronne à la photosphère sous-jacente, dont le gaz est en mouvement, révélant des cellules convectives. La convection, montée de gaz chaud à l'intérieur d'une cellule, qui se refroidit et redescend sur la paroi de la cellule, est le mécanisme de transport de l'énergie solaire vers la photosphère sur le dernier tiers du rayon solaire. Ces mouvements transfèrent de l'énergie au champ magnétique. Elle est transportée dans la couronne par des courants électriques qui circulent le long des lignes de force.

À l'arrivée dans la couronne, elle est convertie en chaleur directement – c'est le processus de chauffage de la couronne – ou emmagasinée, puis relâchée brusquement après plusieurs heures. C'est alors une éruption solaire ou une éjection coronale de masse.

Dans une éruption, un volume de gaz de la couronne est chauffé à plusieurs dizaines de millions de degrés, et quelques particules sont accélérées à des vitesses élevées. Dans certains cas, elles avoisinent la célérité de la lumière. Au cours d'une éjection de masse, une grande structure magnétique de la couronne est éjectée dans l'espace, avec le gaz qu'elle confine. Le chauffage et l'accélération des particules entraînent des augmentations brusques des émissions de la couronne, donc en EUV, rayons X et radio, qui durent quelques minutes à plusieurs heures. La région brillante dans l'image de gauche de la figure 2 illustre ce phénomène. Les particules accélérées peuvent aussi être tracées par leur rayonnement électromagnétique, parfois en rayons gamma. Certaines s'échappent de la couronne et peuvent être mesurées à bord de sondes spatiales. L'image de droite de la figure 2 montre l'instantané d'une éjection de masse. Les traits blancs sur l'image sont les traces de l'impact de protons de haute énergie, accélérées au cours de l'éruption par l'onde de choc qui se forme autour de cette éjection de masse rapide. Les structures magnétiques éjectées traversent l'espace interplanétaire à des vitesses entre quelques dizaines et plusieurs milliers de km/s – on peut les voir comme des rafales dans le vent solaire.

La structure magnétique de la couronne et la fréquence des évènements éruptifs varient avec une période d'environ 11 ans – le cycle d'activité du Soleil, identifié d'abord dans le nombre de taches solaires.

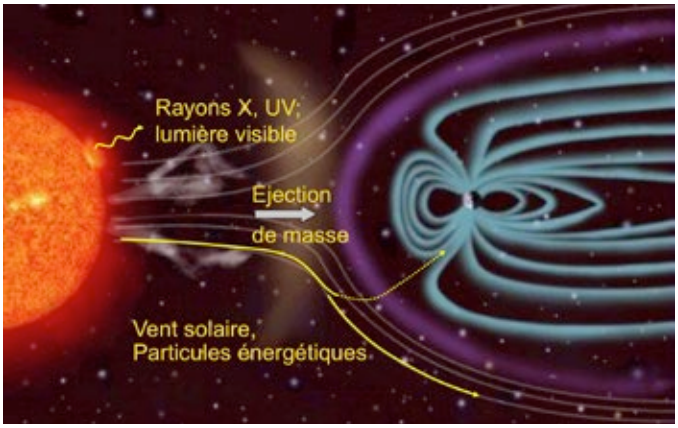


Fig.3. **Dessin schématique du système Soleil – magnétosphère terrestre. Les distances ne sont pas à l'échelle.**

L'environnement spatial de la Terre et les perturbations solaires

À la différence des autres étoiles, qui constituent un intérêt astrophysique, le Soleil exerce un effet sur l'environnement spatial de la Terre, à savoir le champ magnétique et la haute atmosphère terrestres. Les perturbations solaires atteignent la Terre en 8 minutes pour les ondes électromagnétiques, quelques dizaines de minutes pour les particules de haute énergie, moins d'un jour pour les éjections de masse les plus rapides, deux à quatre jours pour le vent solaire, selon sa vitesse.

La figure 3 montre schématiquement le Soleil et le champ magnétique de la Terre. La distance entre les

deux est réduite pour que la figure reste lisible. Le champ magnétique terrestre est en première approximation dipolaire. Les parties extérieures sont déformées par les particules électriquement chargées du vent solaire : le côté tourné vers le Soleil est comprimé, tandis que du côté opposé la magnétosphère est allongée par le vent solaire qui passe. La plupart des particules chargées, qu'il s'agisse du vent solaire ou de particules énergétiques, sont déviées autour de la magnétosphère. Seuls les cornets polaires, régions de séparation entre les lignes de force qui se bouclent face au Soleil et du côté nuit, laissent une étroite entrée.

Le sol de la Terre est bien protégé contre la plupart des effets de la variabilité du Soleil : les rayonnements EUV et X sont absorbés dans la haute atmosphère, entre quelques dizaines et plusieurs centaines de km au-dessus du sol. Le terme « absorption » signifie que l'énergie de l'onde électromagnétique incidente est utilisée pour dissocier des molécules et ioniser des atomes. Les rayonnements EUV du Soleil créent l'ionosphère de la Terre, une couche qui commence entre 50 et 80 km au-dessus du sol, contenant une fraction d'électrons et d'ions libres. Par ailleurs l'impact des rayonnements sur les atomes et molécules leur donne une énergie élevée, qui se traduit collectivement par le chauffage de l'atmosphère. Un éclairage accru par le rayonnement EUV et X a donc pour conséquence une ionisation accrue et une atmosphère plus chaude, qui s'étend à cause de l'agitation thermique accrue des atomes et molécules.

Les protons, électrons et ions énergétiques, tant que leur énergie ne dépasse pas un certain seuil, n'atteignent l'atmosphère terrestre que dans les cornets polaires. Le premier effet est l'ionisation supplémentaire quand ces particules choquent les molécules et atomes de l'atmosphère. La plupart du temps les effets ne vont pas plus loin. Mais les protons et noyaux d'hélium les plus rapides, accélérés lors de quelques rares éruptions solaires, peuvent casser les noyaux atomiques dans la haute atmosphère et créer des particules secondaires qui ont elles-mêmes des énergies élevées, pouvant casser d'autres noyaux sur leur chemin. Cette cascade atmosphérique peut se poursuivre jusqu'au sol.

La configuration Soleil – environnement spatial de la Terre est loin d'être statique. Le champ magnétique solaire, emporté par le vent solaire et les éjections de masse, interagit avec la magnétosphère terrestre de différentes façons, selon la vitesse et l'orientation du champ magnétique de la perturbation. L'impact sur la magnétosphère va la comprimer plus que d'ordinaire. Si le champ magnétique venant du Soleil fait un angle important avec celui de la Terre, les deux peuvent se reconnecter, ce qui permet un transfert plus efficace de l'énergie du vent solaire ou de l'éjection de masse à la magnétosphère. Dans tous les cas l'impact crée des courants électriques qui circulent le long des lignes de force de la magnétosphère, surtout aux alentours des cornets polaires, et peuvent se fermer dans l'atmosphère des régions de hautes latitudes. Les courants y chauffent le gaz, créant de l'ionisation supplémentaire. Lors d'éjections de masse ou de courants de vent solaire particulièrement énergétiques, des champs électriques sont induits aussi dans la croûte terrestre. Les transformations de la magnétosphère terrestre lors d'un grand orage géomagnétique conduisent aussi à l'accélération de particules. Une trace visible sont les aurores boréales et australes, visibles à des latitudes géographiques inhabituellement basses lors de certains grands orages – même dans les Caraïbes lors du plus important connu, survenu en 1859.

La météorologie de l'espace

L'ionosphère et la propagation d'ondes radio

La mise en évidence de l'ionosphère terrestre date d'une expérience de télécommunication transcontinentale en 1901, entre Terre-Neuve et l'Angleterre. Il n'y a pas de visibilité directe entre les deux, l'onde radio devait être réfléchie dans la haute atmosphère – l'ionosphère. La variation, au cours du cycle d'activité solaire ou lors d'évènements sporadiques, de l'intensité du rayonnement EUV qui la crée rend les conditions de propagation des ondes radio variables : absorption aux fréquences utilisées pour la communication à grande distance, déviation du signal de la ligne droite et retards d'arrivée à d'autres fréquences.
Dès la deuxième guerre mondiale les armées utilisaient des observations solaires pour prévoir l'état de l'ionosphère et prédéfinir des fréquences de communication sur de grandes distances. Ce besoin persiste aujourd'hui. La navigation par satellite par exemple repose sur la communication sol-espace et la visée précise vers les satellites. Des communications radio sont aussi utilisées par l'aviation civile sur des routes passant près des pôles, où des satellites qui servent à la navigation aux plus basses latitudes ne sont plus visibles. En cas de fortes perturbations solaires, la précision du positionnement et du temps de propagation du signal est réduite.
Tandis que les émissions EUV et X du Soleil modifient la haute atmosphère de la Terre, les sursauts radio lors des éruptions arrivent au sol. C'est ainsi qu'un fort sursaut perturba les radars de contrôle aérien en novembre 2015, au point que certains aéroports au sud de la Suède arrêtèrent le décollage et l'atterrissage pendant une heure.

Les radars scrutant l'horizon au moment du coucher du Soleil prenaient le sursaut de face. D'autres sursauts radio ont occasionné des pertes temporaires de sensibilité de systèmes GPS.

L'atmosphère neutre et l'orbitographie

L'expansion de l'atmosphère terrestre chauffée par le rayonnement EUV-X du Soleil ou par la dissipation des courants électriques des orages géomagnétiques fait qu'un satellite en orbite basse, autour de 400 km d'altitude, se trouvera dans une atmosphère plus dense. Freiné par la friction, le satellite perd de l'altitude. Des manœuvres sont nécessaires pour le remonter. Un cas extrême est la perte du satellite ASTRO D, à la suite d'un freinage atmosphérique accrue lors d'un orage géomagnétique en juillet 2000. La surveillance de débris spatiaux, qui s'accumulent à cause de la prolifération des satellites artificielles, et les activités militaires reliées sont aussi fortement impactées par les changements d'orbite qu'engendre l'activité solaire au travers de la variabilité de la densité de l'atmosphère terrestre.

Particules de haute énergie : électronique embarquée et cellules du vivant

L'impact des ions sur des composants électroniques peut les endommager, avec un effet immédiat ou d'usure sur le long terme. Des ions peuvent aussi créer des incidents ponctuels comme l'induction de commandes erronées dans les calculateurs. La capacité inégale des électrons et ions de pénétrer des matériaux peut conduire à l'accumulation locale de charges et finalement à une décharge électrique. Ce sont des effets bien connus des constructeurs de satellites. On peut se prémunir contre des incidents par des mesures d'ingénierie comme l'utilisation de matériaux résistants ou le doublage de circuits électroniques qui assurent le fonctionnement de l'un quand l'autre est perturbé. Selon les ingénieurs du CNES, la fabrication de satellites avec les spécifications strictes déduites notamment de quelques grands évènements solaires à particules et du spectre du rayonnement cosmique galactique, a fait ses preuves pour éviter des pertes. La miniaturisation des électroniques et la course aux équipements à bas coûts peuvent augmenter la vulnérabilité des satellites. Des effets similaires peuvent intervenir dans l'air (avionique) et même au sol, mais l'atmosphère procure une protection largement accrue. L'environnement spatial est surveillé avant les lancements de satellites, qui peuvent être suspendus en cas d'un évènement solaire fort, tout comme pendant une situation météorologique adverse.

Les particules de haute énergie peuvent aussi endommager des cellules biologiques. Les cellules vont initier leur propre réparation, ou bien mourir. La mort d'un nombre trop grand de cellules produira des effets immédiats sur la santé, tandis que la survie et la multiplication de cellules mal réparées augmentent le risque de conséquences tardives, notamment le développement de cancers. Pour le personnel navigant de l'aviation civile, le suivi individuel des doses reçues lors des vols est obligatoire en Europe. En France, cette surveillance est réalisée par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Une prévision des intensités du rayonnement cosmique permanent, venant de la Galaxie, est fournie par l'Observatoire de Paris pour les mois à venir, et en cas d'un évènement solaire la dose de radiation supplémentaire est évaluée à partir des mesures par des détecteurs au sol, les moniteurs à neutrons.

Les astronautes ne bénéficient d'aucune protection par l'atmosphère. Les vols vers la Lune et Mars seront exposés de plein fouet aux particules de haute énergie. Des protections matérielles existent, mais ne sont pas complètes : la réaction de particules de haute énergie avec ces matériaux peut créer des particules secondaires qui sont aussi dangereuses que les primaires, sinon plus. C'est un enjeu crucial des vols spatiaux habités.

Au sol de la Terre : réseaux électriques

L'impact d'un courant solaire ou d'une éjection de masse particulièrement rapides crée des variations du champ magnétique de la Terre sur des échelles de quelques secondes à plusieurs minutes. Elles induisent une force électromotrice dans l'atmosphère et à la surface de la Terre, engendrant des courants électriques dans des transformateurs et les réseaux de transmission de l'électricité. Comme sa variation est lente par rapport aux 50 Hz ou 60 Hz des réseaux, la perturbation peut être considérée comme un courant continu se superposant au courant alternatif transporté. Ceci peut conduire à la saturation d'un transformateur pendant un demi-cycle d'opération, avec des conséquences variant avec l'intensité du courant continu et qui peuvent aller jusqu'à la coupure du réseau. En 1989 des transformateurs ont même été détruits dans la province du Québec, créant une panne de courant de plusieurs heures. Ces effets sont plus prononcés à haute latitude magnétique, où les lignes de champ magnétique les plus exposées aux variations solaires entrent dans le sol. Mais deux transformateurs ont également été endommagés en Grande-Bretagne lors de l'orage de mars 1989. L'intensité des courants dépend aussi de la conductivité du sol, ce qui crée des variations géographiques en plus de celles dues à la latitude magnétique. On voit notamment une différence notable entre la Grande-Bretagne et la France, qui fait penser que la France est mieux protégée par sa localisation magnétique et la nature de son sol.

Résumé et conclusion

La variation de la couronne solaire a des répercussions sur l'environnement spatial de la Terre et, au travers de cela, sur la technologie humaine. Ce fait était connu dès la seconde guerre mondiale – la météorologie de l'espace n'est pas une discipline récente. Mais elle s'est beaucoup développée avec l'opération de satellites et la généralisation de services basés sur ceux-ci.

Bien des effets adverses de la météorologie de l'espace sont maîtrisés par des solutions éprouvées d'ingénierie et des activités de prévision. La question est alors de savoir quantifier un évènement solaire extrême qui arrivera très rarement, mais peut avoir un impact lourd. La défaillance de systèmes électriques qui créeraient des pannes prolongées serait un risque majeur pour la société toute entière. Le recul historique que nous permettent les observations est de quelques dizaines d'années, 150 ans pour les orages géomagnétiques. Il y a là des besoins en recherche pour caractériser ces évènements, et il y a un intérêt à améliorer l'échange d'informations entre l'industrie, qui connaît les pannes survenues, et la recherche, qui travaille sur les processus physiques.

La recherche en relations Soleil-Terre a développé en France et ailleurs un certain nombre d'activités qui peuvent déboucher sur des services en météorologie de l'espace. Des collaborations existent avec l'aviation civile et l'armée, avec des intensités d'échange qui varient entre autres avec le cycle solaire. Une réelle activité organisée en météorologie de l'espace doit passer par la collaboration entre les utilisateurs et la recherche. La recherche ne peut se substituer aux utilisateurs pour affirmer l'importance de la météorologie de l'espace. Elle ne peut en général pas organiser une activité opérationnelle. Mais elle est en mesure de fournir des outils et une expertise susceptibles de soutenir des activités opérationnelles menées par les utilisateurs. C'est depuis 2019 le cas pour un service de météorologie de l'espace au bénéfice de l'aviation civile mondiale, fourni par plusieurs consortia internationaux, avec la participation de la France autour de Météo France et des sociétés CLS et ESSP, et avec un fort soutien d'instituts de recherche dans différents pays européens.

■

Exposition « Face au soleil. Un astre dans les arts » au musée Marmottan Monet

Le Soleil n'est pas à l'honneur que dans ce numéro des *Cahiers Clairaut*, il l'est aussi au musée Marmottan Monet jusqu'au 29 janvier 2023. À l'occasion du 150e anniversaire du tableau *Impression, soleil levant* de Claude Monet, l'exposition « Face au Soleil » propose de retracer la représentation du Soleil dans les arts, de l'Antiquité à nos jours, à travers de plus de soixante œuvres, provenant de collections privées et publiques du monde entier. L'occasion de découvrir ou redécouvrir de grands peintres de toutes les époques et de tous les styles : Monet, Munch, Pissaro, etc. Et constater que notre astre est une source d'inspiration artistique en plus d'être une source d'énergie ! À noter qu'à l'occasion de cette exposition, un magnifique ouvrage éponyme est paru aux éditions Hazan.

https://www.marmottan.fr/wp-content/uploads/2021/12/DP-faceausoleil-BD-bis.pdf



RÉALISATION D'UN TÉLESCOPE POUR L'IMAGERIE SOLAIRE

Roger Meunier

L'auteur décrit avec beaucoup de détails comment réaliser soi-même un télescope de qualité pour observer le Soleil.

Dans quel but ? Pour faire de la haute résolution de la photosphère solaire avec des filtres interférentiels de différentes longueurs d'onde. Quelques exemples : 396 nm pour la raie du calcium, 430 nm pour la bande G, 540 nm, 589 nm pour la raie du sodium, 656 nm pour la raie H alpha…Le diamètre choisi (200 mm non aluminé) est suffisant, surtout si on n'a pas un site exceptionnel. De plus, les prix des miroirs augmentent très rapidement au-delà de 200 mm. Le miroir utilisé a été fabriqué par un artisan, mais on peut très bien utiliser un miroir de fabrication industrielle (environ 350 euros les deux miroirs) dont on enlève l'aluminure (par trempage dans un bain d'acide chlorhydrique, par exemple).



Image 1



Image 2

Images 1 et 2 : ces deux vues d'ensemble montrent le choix d'une construction bois et alu ; le bois utilisé est du contreplaqué extérieur de 15 ou 30 mm (pour cela, on colle deux épaisseurs de CTP). Les cornières alu font 35 mm de large. La conception aérée évite les accumulations de chaleur dans le tube et assure une meilleure ventilation du miroir primaire. Le télescope pèse environ 10 kg (on doit pouvoir faire un peu plus léger…).

Avant de commencer la fabrication, il est essentiel de tracer une épure à l'échelle 1 de l'instrument. Il faut avoir défini le diamètre et la focale du miroir primaire (ici 200 mm et 1 200 mm). Miroir secondaire (48 mm de petit axe) avec aluminisation classique ; si on veut une dilatation minimale des miroirs, les choisir en Zérodur, ou équivalent. On prendra soin de faire sortir le foyer du télescope suffisamment par rapport au porte-oculaire pour laisser de la place aux filtres, barlows, raccords divers qui seront nécessaires (pour mon télescope, il y a environ 100 mm entre la sortie du porte-oculaire et le capteur. Il est prudent d'acheter tout ce que vous ne fabriquez pas vous-même AVANT de commencer la construction !



Image 3

Image 3 : montre la conception générale du montage du miroir primaire. La plaque de bois de 15 mm d'épaisseur

placée un peu au-dessus de celui-ci permet d'améliorer la rigidité ; ça peut aussi servir de support pour une protection du miroir.

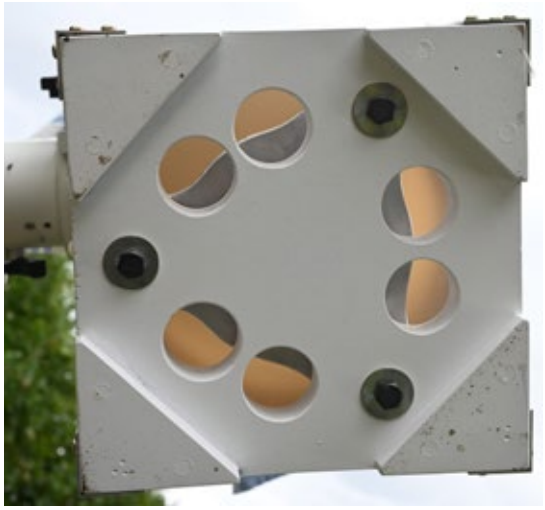


Image 4

Image 4 : cette vue arrière montre les 3 vis de réglage du miroir primaire ; On notera aussi 4 cales triangulaires



Image 5

permettant de faire reposer le télescope sur sa face arrière sans risque d'appuyer sur les vis de réglage.
Image 5 : on peut y voir à la fois une des trois vis de réglage de l'orientation du miroir équipée d'un ressort assez raide qui empêche tout déréglage involontaire. Trois vis nylon servent à centrer le miroir tandis que trois vis plus petites sont placées juste au-dessus du miroir, dépassant de quelques millimètres pour éviter tout basculement de celui-ci. Sur la platine triangulaire supportant le miroir primaire, sont collés trois patins silicone sur lesquels repose le miroir.

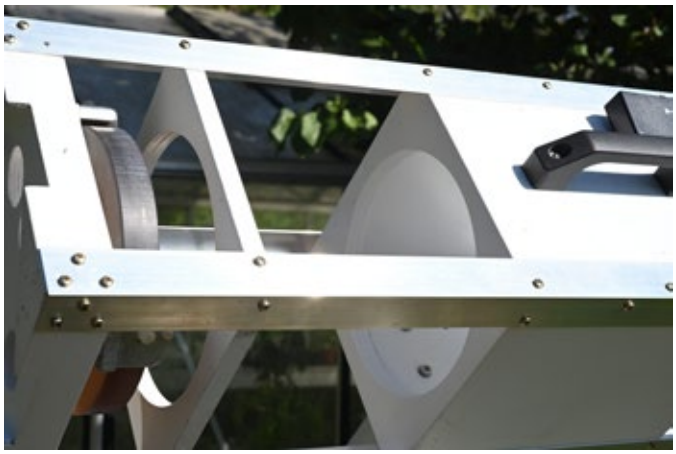


Image 6



Image 7

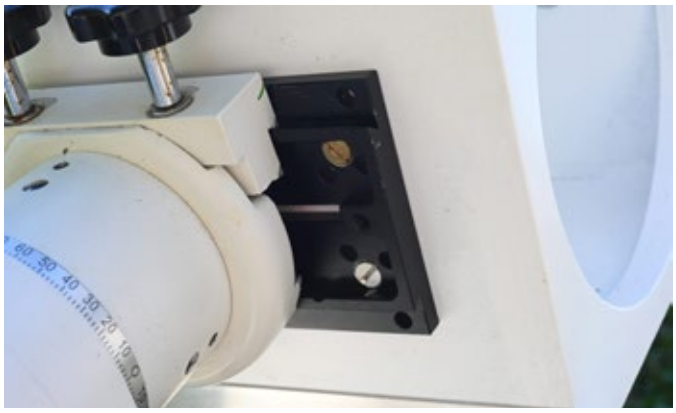


Image 8

Images 6,7 et 8 : moitié arrière de l'instrument pour bien voir le caisson central ; celui-ci est muni d'une poignée sur le dessus et d'une platine type Losmandy en dessous pour la fixation sur une monture.



Image 9

Image 9 : le porte-oculaire est fixé sur une plaque alu de 5 mm d'épaisseur ; il faudra prévoir une place vers l'avant du télescope pour le support du chercheur. Il existe des modèles dédiés au Soleil qui sont pratiques d'emploi.

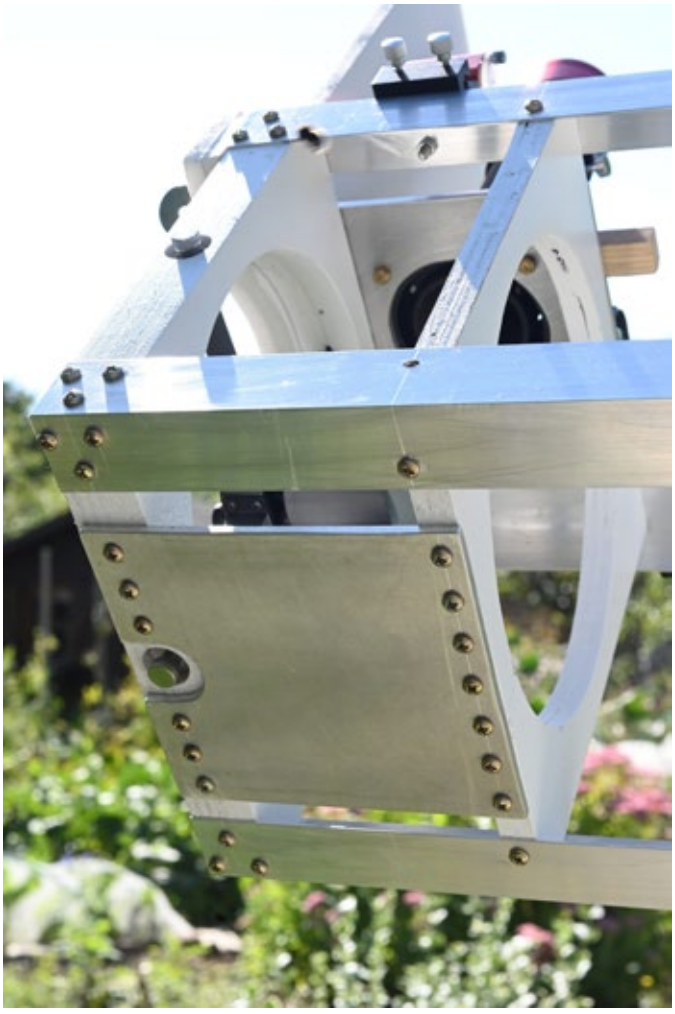


Image 10

Images 10 : la face opposée au porte-oculaire nécessite aussi une plaque alu de 5 mm pour participer à la bonne rigidité de l'ensemble.



Image 11

Image 11 : l'araignée supporte le miroir secondaire ; cette araignée comporte des tiges filetées à l'extrémité des 4 branches. J'aurais pu faire plus simple en prévoyant de fixer les tiges filetées à travers des plaques ou équerres métalliques plutôt qu'une assez grande épaisseur de bois, ce qui m'a obligé à un usinage plus complexe.



Image 12

Image 12 : l'écran de protection en carton plume de 5 mm minimum est bien utile en usage solaire ; cela évite que tout ce qui est fixé sur le porte-oculaire soit chauffé inutilement. Il est démonté lorsqu'on n'observe pas car c'est relativement fragile.



Image 13

Image 13 : le porte-oculaire est équipé ici d'un moteur de mise au point ; c'est très utile avec un Newton car, étant assis devant l'ordinateur, il faut avoir des bras à rallonges pour atteindre la molette de mise au point ! Si on observe avec un télescope type Cassegrain, par exemple, ce n'est pas une obligation.

Remarques : le choix d'avoir un miroir primaire non aluminé ne transmet que 4 % de la lumière solaire. On complète ce premier filtrage à l'aide de filtres interférentiels (dimension 1" ¼) d'environ 10 nm de bande passante. Avec ce mode de filtration, on obtient en général des temps de pose très courts avec les caméras CMOS récentes (souvent inférieurs à la milliseconde). Évidemment, pas d'observation visuelle dans cette configuration ; si on veut observer à l'oculaire, mettre des filtres de densité, référencés ND… pour être en sécurité ! D'ailleurs, si vous n'envisagez pas de faire de la haute résolution, c'est-à-dire un champ limité à quelques minutes d'arc, mais simplement de l'observation visuelle, un instrument du commerce basique suffit, par exemple une lunette de 80 ou 100 mm de diamètre achromatique. On l'équipe d'un filtre Astrosolar de chez Baader devant l'objectif, complété par un filtre interférentiel 1" ¼ à lambda = 540 nm de chez Baader également.

■

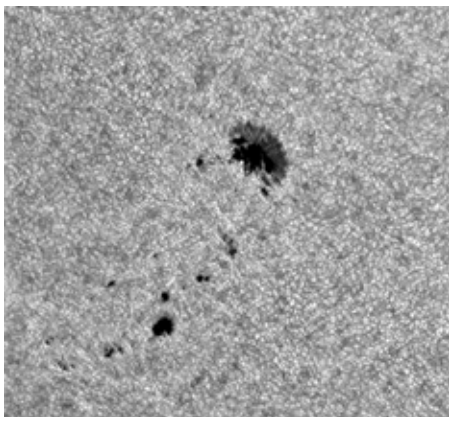


Image 15

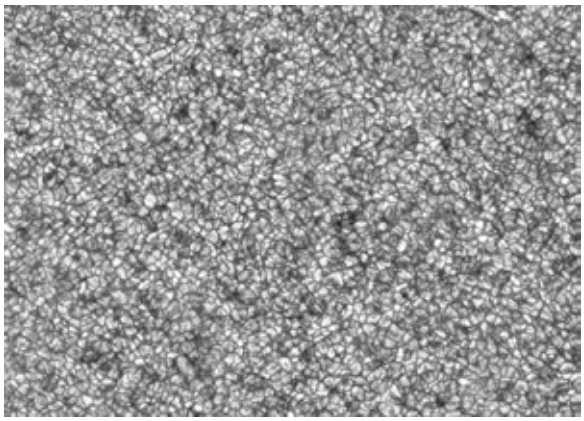
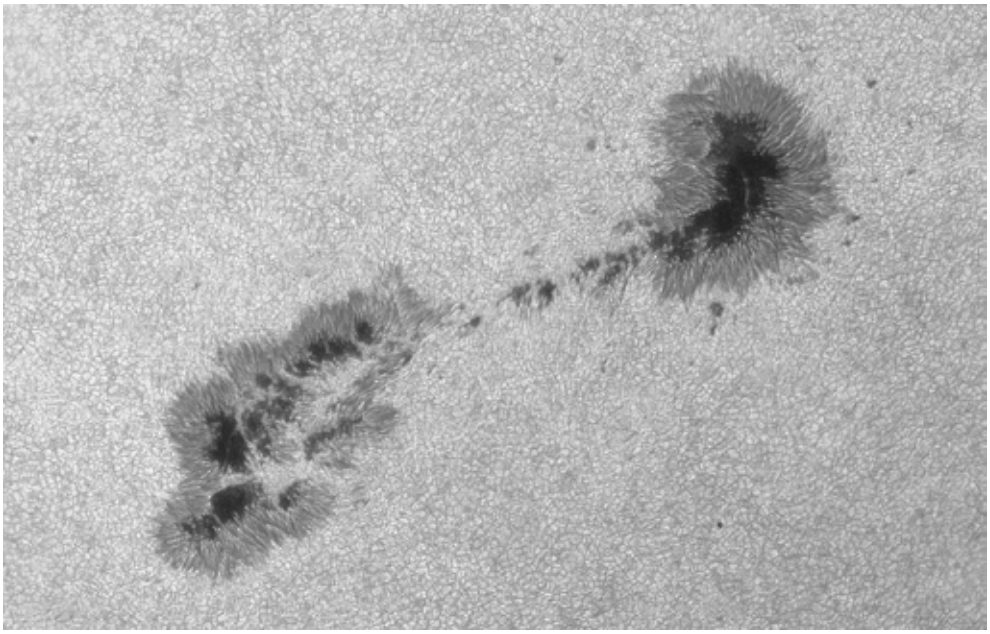


Image 16 **Granulation.**

Image 14 **Taches solaires.**



LA MISSION SOLAR ORBITER, PREMIERS RÉSULTATS
UN AN APRÈS LE DÉBUT DE LA PHASE SCIENTIFIQUE NOMINALE

Milan Maksimovic, Directeur de Recherches au CNRS, Astrophysicien au LESIA, Observatoire de Paris, responsable de l'instrument RPW (Radio & Plasma Waves)

Cette mission est destinée à comprendre le mécanisme des émissions solaires. Elle devrait permettre de résoudre l'énigme du chauffage étonnant de la couronne solaire et de réduire l'impact des activités solaires sur les activités humaines.

Ce premier novembre 2022, la sonde Solar Orbiter a accompli la première année de sa phase scientifique nominale. Principalement développée et financée par l'Agence spatiale européenne (en anglais ESA pour European Space Agency) et les états membres, avec une participation américaine de la NASA (National Aeronautics and Space Administration), la sonde a été lancée le 10 février 2020 depuis Cap Canaveral en Floride. Depuis, elle a parcouru plus de 2 milliards 932 millions de kilomètres, a subi trois assistances gravitationnelles par Vénus et une par la Terre qu'elle a frôlée à seulement 460 km d'altitude pour se retrouver sur sa trajectoire elliptique actuelle avec un périhélie[1] de 0,29 unité astronomique[2] du Soleil. Ce périhélie sera atteint le 11 avril 2023.

La mission Solar Orbiter, doit répondre principalement à la question « Comment le Soleil crée-t-il et contrôle-t-il son héliosphère ? », région de l'espace soumise à l'influence du vent solaire (flux de particules électriquement chargées) et qui englobe l'ensemble du Système solaire. Ce programme a formellement été approuvé par le Comité des programmes scientifiques de l'ESA en octobre 2011. Il est le fruit de deux décennies de soutien et de promotion scientifique d'une communauté astrophysique constituée à la fois par les physiciens « solaires », traditionnellement observateurs du Soleil et de sa couronne par imagerie, et par les spécialistes des plasmas astrophysiques accessibles depuis l'espace. La sonde Solar Orbiter comporte une charge utile de dix instruments dédiés à l'étude du Soleil, de son vent solaire ainsi que de l'héliosphère interne (la plus proche du Soleil).

L'humanité vit dans l'atmosphère étendue du Soleil qu'est l'héliosphère. Comprendre les connexions et le couplage entre le Soleil et l'héliosphère est d'une importance fondamentale pour nos sociétés qui dépendent fortement de technologies de communication satellitaires sensibles aux perturbations d'origine solaire.

1 Endroit de la trajectoire qui est au plus proche du Soleil,
2 L'unité astronomique (UA) est la distance entre la Terre et le Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres.

Pourquoi étudier le vent solaire ?

Le vent solaire est le résultat de l'expansion thermique de la couronne solaire qui, suite à une température élevée à sa base, ne peut rester en équilibre hydrostatique autour du Soleil. En effet, la couronne solaire, dont la température est de l'ordre de 5 500 kelvins à sa base, voit sa température atteindre brutalement environ un million de kelvins à une altitude de l'ordre de 2 000 km. Cette énergie thermique est ensuite convertie en énergie cinétique pour donner naissance à un vent qui devient supersonique à une distance de quelques rayons solaires du Soleil et dont la vitesse d'expansion est ensuite comprise entre 200 et 800 km/s. Par quel(s) mécanisme(s) et par le biais de quelle(s) source(s) d'énergie la couronne solaire est-elle chauffée ? Quelle est la physique exacte de l'accélération du vent solaire et notamment de celle du vent rapide (≈ 800 km/s) qui est émis par les trous coronaux solaires où la température des électrons du plasma est paradoxalement plus faible que dans le reste de la couronne ? Malgré une série quasi ininterrompue de missions spatiales solaires lancées à partir des années 1960 et malgré de nombreux progrès à la fois observationnels et théoriques réalisés durant cette période, ces questions, qui sont probablement liées, constituent une des dernières grandes énigmes de la physique solaire, avec des implications probables pour la physique stellaire en général et les relations entre les nombreuses exoplanètes et leurs étoiles respectives.

Le magnétisme solaire, moteur de l'héliosphère

Le champ magnétique du Soleil, qui joue un rôle central dans la quasi-totalité des problématiques scientifiques abordées par Solar Orbiter, est créé à l'intérieur de notre étoile par ce qu'on appelle l'effet dynamo. D'immenses structures magnétiques sont générées au sein du Soleil et s'élèvent vers la surface par poussée d'Archimède en formant de larges arches. Une fois émergées, celles-ci créent les taches solaires visibles sur la surface – zones de

champ magnétique intense et de température inférieure à celle de la surface environnante – ainsi que les boucles magnétiques observables dans l'atmosphère du Soleil. Ces boucles, ancrées à la surface du Soleil peuvent stocker, sous forme magnétique, de grandes quantités d'énergie mécanique associée aux mouvements convectifs de la photosphère (surface visible du Soleil). Ces derniers sont similaires aux mouvements de bouillonnement de l'eau d'une casserole posée sur une plaque chauffante. Quand les boucles magnétiques coronales deviennent instables, de gigantesques éruptions se produisent alors et génèrent un très grand nombre de particules énergétiques (ions, électrons, neutrons…) et de photons visibles, gamma, X et ultraviolets, comme le feraient les grands accélérateurs de particules sur Terre. Une fraction, parfois importante, de ces particules énergétiques peut s'échapper de la couronne solaire vers le Système solaire. En parallèle, ces éruptions solaires peuvent parfois éjecter des quantités phénoménales de matière, sous forme de plasma (typiquement 10^{12} kg), à une vitesse de plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Les conséquences de l'impact de ces éjections coronales dites de masse et de ces particules énergétiques sur les magnétosphères, les atmosphères planétaires et les satellites artificiels constituent le sujet d'étude de la météorologie de l'espace. Cette discipline étudie l'impact de l'activité solaire sur les activités humaines, des routes aériennes polaires aux voyages interplanétaires en passant par les télécommunications ou bien la qualité du signal GPS.

Solar Orbiter, son profil de mission et son instrumentation

Le principe de base de la mission Solar Orbiter est de s'approcher le plus possible du Soleil afin de capturer et caractériser, par imagerie, le déclenchement des éruptions solaires et des éjections coronales de masse, puis analyser *in situ* le plasma constitutif de ces bourrasques de vent solaire avant que leurs propriétés ne soient modifiées par leur propagation dans l'héliosphère. Après avoir été générée, une éjection coronale de masse typique met une quarantaine d'heures pour atteindre l'orbite terrestre. Solar Orbiter, qui peut s'approcher à moins d'un tiers d'UA du Soleil, permettra d'observer la matière coronale générée par une éruption solaire seulement une douzaine d'heures après sa naissance.

La sonde européenne a donc été lancée le 10 février 2020 par un lanceur américain fournit par la NASA et a emporté une batterie complète de dix instruments, dont l'accommodation sur la sonde est illustrée sur la figure 1. Parmi ces derniers, quatre – dits instruments *in situ* – permettent une caractérisation détaillée des particules et des champs électriques et magnétiques du vent solaire localisés autour de la sonde. Il s'agit de l'analyseur du vent solaire SWA (Solar Wind Analyser), du détecteur de particules énergétiques EPD (Energetic Particle Detector), du magnétomètre à saturation MAG (Magnotemeter) et de l'analyseur d'ondes radio et de plasma RPW (Radio and Plasma Wave analyser). Les six autres instruments – dits de télédétection – fournissent, *via* imagerie et spectroscopie à haute résolution et grand champ, des diagnostics du plasma solaire depuis l'intérieur de l'étoile jusqu'à la naissance du vent dans la couronne.

Ces instruments sont : l'imageur-polarimètre PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager), l'imageur ultraviolet extrême EUI (Extreme Ultraviolet Imager), l'imageur spectral 2D de l'environnement coronal fonctionnant dans l'ultraviolet extrême SPICE (Spectral Imaging of the Coronal Environment), le spectro-imageur rayons X STIX (Spectrometer/telescope for Imaging X-rays), le coronographe visible et ultraviolet METIS/COR (Multi Element Telescope for Imaging and Spectroscopy / Coronagraph) ainsi que l'imageur SolO-HI (Solar Orbiter-Heliospheric Imager).

La communauté scientifique française, le CNES (Centre national d'études spatiales) ainsi que le CNRS (Centre national de la recherche scientifique) ont été très impliqués dans le développement de RPW, SWA, EUI, SPICE, PHI et STIX. Par ailleurs, en plus de sa contribution à la mission via le lanceur, la NASA a également fourni l'ensemble de l'instrument SolO-HI ainsi que des parties des instruments SWA et EPD.

Après une phase de croisière de près de 20 mois et plusieurs manœuvres d'assistance gravitationnelle autour de Vénus et de la Terre, la sonde a été placée sur une orbite elliptique autour du Soleil et en fait le tour en 168 jours. À son périhélie de 0,29 UA la sonde est plus proche du Soleil que la planète Mercure. En plus de diminuer le temps de propagation des perturbations solaires dans l'héliosphère interne, ce périhélie de 0,29 UA permet d'obtenir les images de la couronne avec la meilleure résolution jamais atteinte (environ 100 km sur le Soleil). Cette orbite réduit également la rotation apparente du Soleil durant les passages au périhélie, permettant ainsi des observations prolongées des régions qui produisent les perturbations mesurées dans le vent solaire. Du fait de cette orbite particulière, la sonde et son instrumentation sont soumis à un environnement thermique très rude car le flux de rayonnement solaire atteint à 0,29 UA est environ treize fois supérieur à celui qui arrive au niveau de la Terre. Cette contrainte a donc imposé l'utilisation d'un bouclier thermique constitué de plusieurs couches de feuilles de titane et d'aluminium, et recouvert sur sa face avant d'un matériau noir, l'*Enbio Black* (du nom de la société irlandaise qui le produit) ou *Solar Black* spécialement conçu pour cette mission. La face avant du

bouclier, en permanence exposée à la lumière du Soleil, peut ainsi atteindre plus de 500 °C, tandis que la sonde et les instruments en son sein, protégés derrière ce bouclier seront dans leur zone de confort thermique entre –40 et +50 °C.

La mission scientifique primaire (nominale) de Solar Orbiter doit durer cinq ans. Une extension de mission, si elle a lieu à partir de 2026, permettra, grâce à de nouvelles manœuvres gravitationnelles autour de Vénus, d'incliner l'orbite de la sonde jusqu'à 30° par rapport au plan de l'écliptique (le plan de l'orbite de la Terre et de la plupart des planètes autour du Soleil). Cette orbite originale devrait offrir un avantage inédit : observer pour la première fois par imagerie les pôles de notre étoile.

Complémentarité avec la mission américaine Parker Solar Probe

Lancée le 12 août 2018, la sonde de la NASA Parker Solar Probe (PSP) – appelée ainsi en l'honneur d'Eugene Parker, astrophysicien américain spécialiste de physique solaire – est en quelque sorte la cousine de Solar Orbiter (SO). Bien

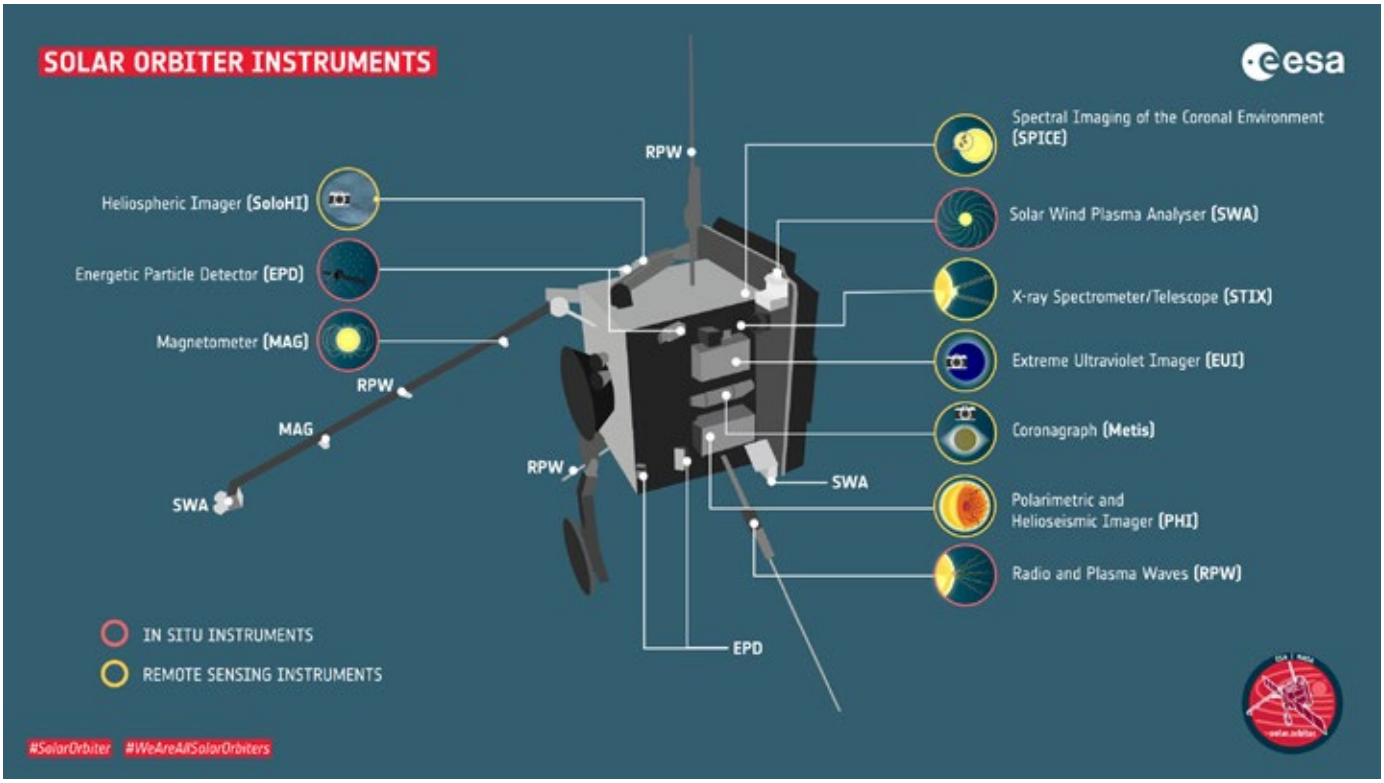


Fig.1. **Les instruments de Solar Orbiter.**

que leur genèse et leurs parcours programmatiques soient indépendants, elles sont fortement complémentaires. En fin de mission, vers 2025, PSP s'approchera bien plus près que Solar Orbiter du Soleil, à dix rayons solaires, soit environ 6 millions de kilomètres seulement de sa surface.

À cette distance, il n'est pas question de faire d'image du Soleil car le flux de photons est bien trop important. PSP effectuera essentiellement des mesures et, lorsque les deux sondes seront alignées, PSP analysera le plasma des éjections coronales de masse entre le Soleil et Solar Orbiter. Une dizaine d'alignements de ce type sont prévus d'ici à 2025. Ces configurations sont très intéressantes car elles permettent de mesurer la même perturbation solaire en trois endroits de l'espace : dans la couronne par imagerie obtenue par Solar Orbiter, puis in situ par PSP et enfin à nouveau in situ par Solar Orbiter.

Premiers résultats de la mission

Des micro-éruptions dans la couronne solaire

Les premières images obtenues de la couronne de notre étoile le 30 mai 2020, pour la première fois à une distance de 0,5 UA par Solar Orbiter, révèlent l'existence probable d'une grande quantité de toutes petites éruptions solaires, de faible intensité. Ces *micro-éruptions* pourraient jouer un rôle important dans les processus de chauffage de la couronne.

La figure 2 montre une image de la couronne solaire obtenue par l'imageur ultraviolet extrême (EUI) à des longueurs d'onde de 17 nanomètres, correspondant à un plasma dont la température avoisine le million de degrés, et à très haute résolution spatiale. La couleur sur cette image est artificielle car la longueur d'onde originale de l'instrument est invisible à l'œil humain. Cette image révèle une multitude de petites structures

comme celles indiquées par les flèches. Il s'agit de boucles flamboyantes, de points lumineux en éruption et de fibrilles sombres qui sont mobiles lorsqu'on accumule les images pour en faire un film. Ces structures coronales ont été dénommées *feux de camp* (*campfire* en anglais) à l'occasion de cette première observation par Solar Orbiter. Il s'agit de minuscules éruptions solaires qui sont omniprésentes et qui ont des tailles caractéristiques comprises entre 400 et 4 000 km. À noter le cercle dans le coin inférieur gauche de l'image, qui indique la taille de la Terre par comparaison.

Selon certaines théories, ces éruptions miniatures pourraient être considérées comme le *graal* de la physique solaire, en expliquant le fameux réchauffement de la couronne solaire mentionné précédemment. En effet si chacune de ces micro-éruption libère une énergie insignifiante dans l'atmosphère de notre étoile, l'effet additionné d'un très grand nombre de ces objets pourrait constituer la principale contribution à son réchauffement global. Une analogie qui permet d'illustrer ce mécanisme de chauffage est la suivante. Si on fait brûler une allumette dans le salon d'une maison l'hiver, le réchauffement de la pièce sera imperceptible. Par contre si on fait brûler toutes les dix secondes plusieurs milliers d'allumettes dans le salon, on aura un chauffage qui sera efficace.

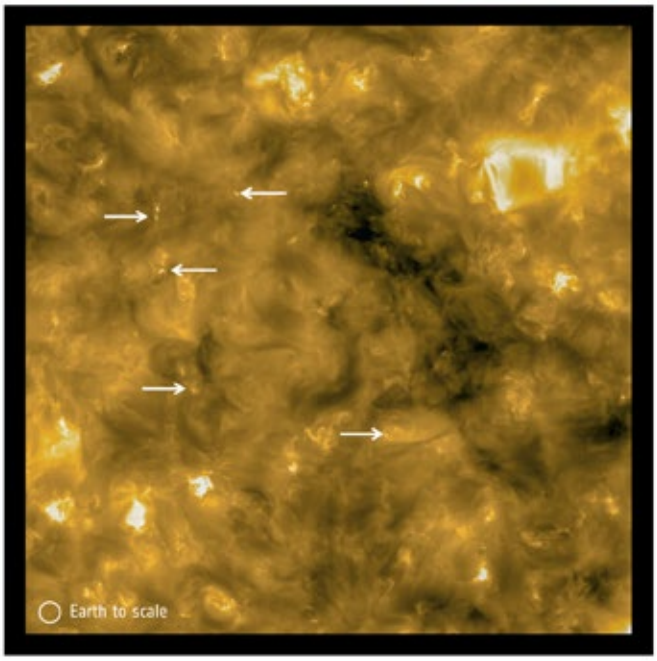


Fig.2. **Les « feux de camp » découverts par Solar Orbiter d'après Berghmans et al., A&A 656 (2021), DOI 10.1051/0004-6361/202140380.**

Émissions radio solaires

L'instrument RPW, dont j'ai la responsabilité scientifique depuis le début du projet, permet à la fois des observations in situ (ondes plasma locales) et des mesures de télédétection par le biais des émissions radio solaires que RPW permet de détecter dans la gamme de 4 kHz à 16 MHz. Cette gamme de fréquences, en dessous de la coupure radio ionosphérique, permet d'observer les émissions radio solaires interplanétaires dites de *type III* (sous classe d'émissions radio solaires). Ces sursauts radio sont produits par des faisceaux d'électrons sub-relativistes (dont les vitesses typiques sont comprises entre 0,03 et 0,3 fois la vitesse de la lumière), accélérés lors d'éruptions solaires au voisinage des régions actives à la surface du Soleil, et se propageant dans la couronne solaire puis dans le milieu interplanétaire le long de lignes de champ magnétique ouvertes. Le passage de ces faisceaux génère localement des ondes électrostatiques, dites ondes de Langmuir, qui résultent de l'oscillation naturelle des électrons ambiants à la fréquence de plasma caractéristique F_p, qui ne dépend que de la densité électronique du milieu ambiant. C'est la relaxation des ondes électrostatiques qui entraîne la production d'ondes électromagnétiques à la fréquence F_p (dite émission fondamentale) et/ou 2 F_p (dite émission harmonique) par un mécanisme de conversion électrostatique vers électromagnétique non encore parfaitement compris. Ainsi comme la densité du plasma du vent solaire ambiant décroît avec la distance, la fréquence des ondes radio de type III décroît rapidement des hautes aux basses fréquences, en même temps que le faisceau d'électrons énergétiques s'éloigne du Soleil. Cette décroissance crée *une virgule* typique sur les spectrogrammes radio de l'instrument RPW comme celle que l'on peut voir sur la figure 3.

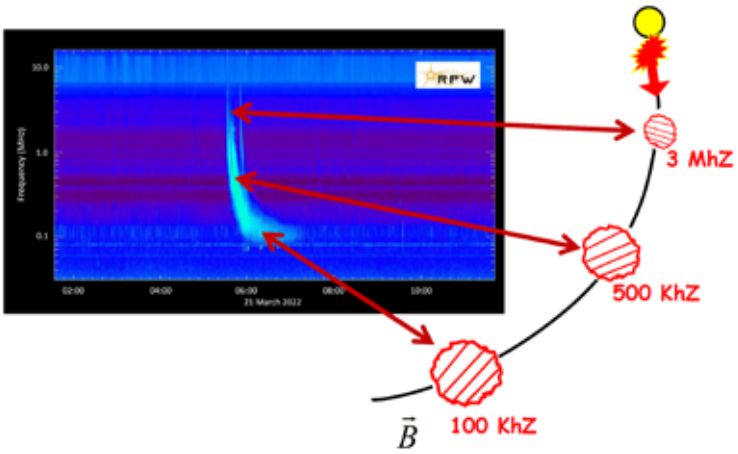


Fig.3. **Décroissance des fréquences des ondes radio de type III.**

L'étude des émissions solaires de type III est intéressante en soi, pour ce qui concerne la physique des plasmas astrophysiques. Cependant ce phénomène est très utile pour repérer les faisceaux d'électrons énergétiques injectés dans le milieu interplanétaire par le Soleil. En effet ces derniers ne peuvent être observés directement et caractérisés par l'instrument EPD que lorsqu'une sonde spatiale se trouve sur le chemin du faisceau et l'intercepte. Cela n'est bien sûr pas le cas de tous les faisceaux injectés par le Soleil dans les *4p* stéradians de l'espace. Les émissions radio de type III permettent, par contre, de repérer les faisceaux, quelles que soient leurs directions d'injection. Ainsi il est très fréquent qu'une sonde puisse *voir* les émissions radio de type III d'un faisceau émis à l'opposé diamétral de l'endroit où elle se trouve.

C'est ainsi que l'instrument RPW sur Solar Orbiter a contribué aux premières observations et *hélio-localisation* d'une émission radio solaire de type III avec quatre sondes différentes. Cette première est illustrée par la figure 4. Le panneau de gauche de cette figure représente les spectres dynamiques des flux radio observés par les quatre sondes utilisées pour cette étude (de haut en bas : Solar Orbiter, Parker Solar Probe, Stereo-A et WIND) qui concerne une éruption solaire ayant eu lieu le 11 juillet 2020 vers 2 h 30. Le panneau en haut à droite montre les positions respectives des quatre sondes ainsi que le résultat de l'*hélio-localisation* du faisceau d'électrons (croix et lignes tiretées violettes). Le panneau en bas à droite présente les courbes de lumière mesurées à 634 kHz par les quatre sondes, dont l'analyse a permis cette localisation.

Pour une mission qui a débuté il y a tout juste un an sa phase scientifique principale, Solar Orbiter a déjà produit beaucoup de résultats remarquables. Paru le 14 décembre 2021, un numéro spécial d'*Astronomy and Astrophysics* rassemble une multitude d'études et d'observations obtenues lors de la phase de croisière de la mission (à noter que sur les 56 articles publiés, 25 se basent sur des données de RPW). Un nouveau numéro est en préparation pour le début de 2023. Solar Orbiter n'en est qu'à ses débuts prometteurs. Cette mission permettra, dans les années qui viennent, d'améliorer grandement nos connaissances sur le Soleil et son fonctionnement.

■

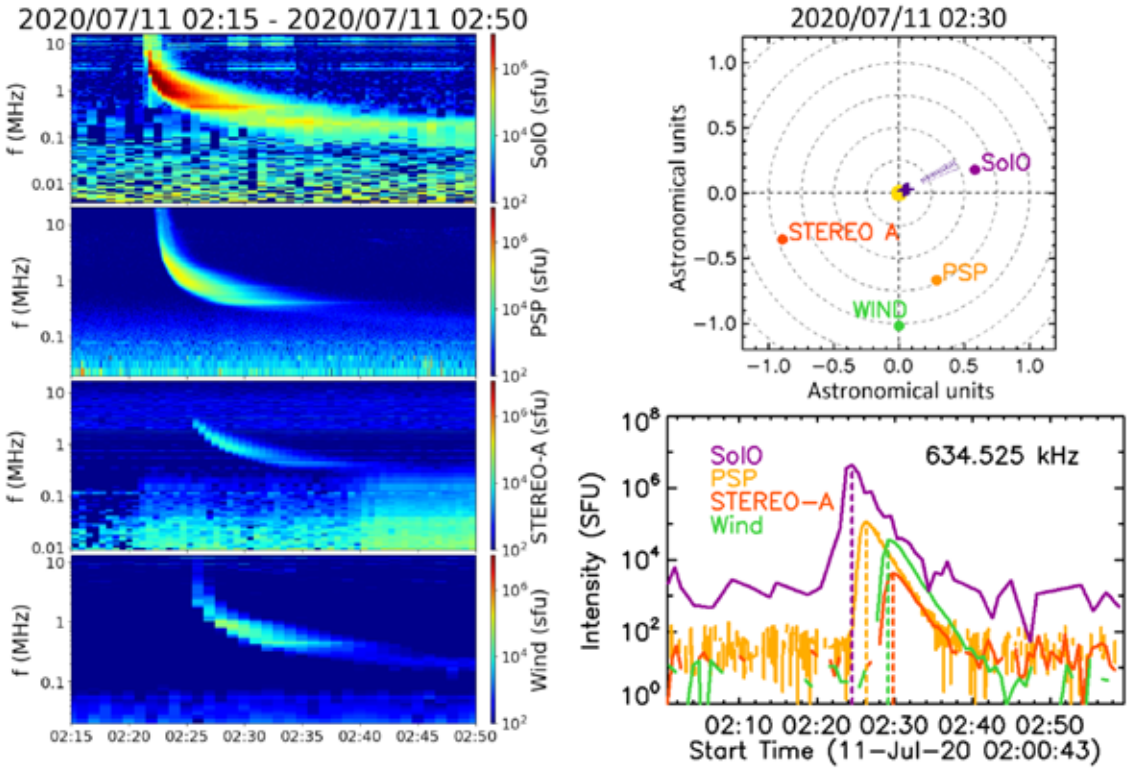


Fig.4. **Spectres dynamiques des flux radio, position des sondes et courbes de lumière d'après Musset S. et al., A&A 656 (2021), DOI : 10.1051/0004-6361/202140998.**

QUELQUES ÉRUPTIONS SOLAIRES PASSÉES

Chantal et Georges Lecoutre

Les éruptions solaires et les éjections coronales de masse sont des phénomènes extrêmes de l'activité solaire qui ont des effets importants sur notre environnement. Prenons le temps de regarder quelques événements passés et les effets qu'ils ont eu sur Terre.

Une éruption solaire se produit à la surface de la photosphère et projette au travers de la chromosphère des jets de matière ionisée. Elle est provoquée par une accumulation d'énergie magnétique dans des zones de champs magnétiques intenses, probablement à la suite d'un phénomène de reconnexion magnétique. Les éruptions solaires sont parfois suivies d'éjections violentes de matière à plus grande échelle : les éjections coronales de masses (CME).

> CME = coronal mass ejection ou éjection coronale de masse. L'expression souvent utilisée, éjection de masse coronale est trompeuse puisqu'elle pourrait faire croire que la matière éjectée provient de la couronne, or c'est de la matière chromosphérique qui est éjectée.

Que peut constater un observateur sur Terre ? L'apparition d'aurores polaires, plus ou moins abondantes et à des latitudes plus basses que la normale, l'impossibilité de passer des appels téléphoniques, un GPS qui met du temps à le localiser sur une carte ou qui ne le localise plus, l'arrêt du flux internet….

Mais ces manifestations ne sont pas les seules et d'autres phénomènes encore plus importants peuvent être enregistrés comme nous allons le voir dans la suite.

Septembre 1859, première observation d'une éruption solaire

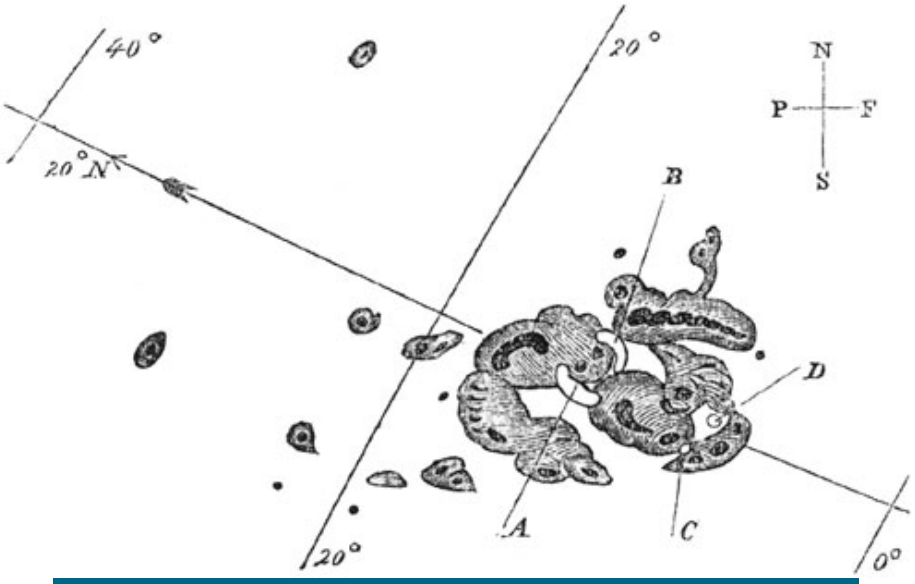
La première relation de l'observation d'une éruption solaire est due à l'astronome britannique Richard Carrington. Le 1er septembre 1859, il constata l'apparition d'une tache très lumineuse à la surface du Soleil (pendant à peu près cinq minutes). Simultanément l'astronome amateur Richard Hodgson fit la même observation. Tous deux envoyèrent immédiatement leur compte-rendu à la Royal Astronomical Society qui les publia dans l'édition de novembre 1859[1].

Cette éruption propagea également des courants électriques dans le sol. Des surtensions dans les lignes télégraphiques furent constatées, choquant les techniciens et incendiant leur papier télégraphique. On rapporta aussi que ces courants firent fondre certains câbles électriques et déclenchèrent localement des incendies. Les magnétomètres du monde entier enregistrèrent de fortes perturbations du champ magnétique terrestre pendant plus d'une semaine. Cette éruption exceptionnelle donna lieu à des aurores boréales qui, le 2 septembre 1859, furent visibles jusqu'en Amérique centrale, au Vénézuela (6° N) et aux Açores (38° N, 28° O) alors que généralement elles se cantonnent à une latitude supérieure à 66° N.

Carrington a été le premier à faire le lien entre ces divers phénomènes.

Selon une étude de E.W. Cliver et L. Svalgaard publiée dans la revue « *Solar Physics* » en 2005 cette tempête solaire qualifiée de «super-tempête» par les spécialistes, fut

1 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 20, Issue 1, November 1859



Dessin de taches solaires de 1859 par Richard Carrington (Wikimedia / American Scientist nov-déc 2007).

probablement le résultat d'une CME accompagnant deux éruptions chromosphériques majeures et successives dont la première fut d'une classe très supérieure à X10[2]. Cette analyse a posteriori a démontré qu'il s'était probablement écoulé moins de 18 heures avant que cette CME n'atteigne la Terre (propagation à plus de 2 000 km/s). Elle a aussi laissé des traces dans les glaces du Groenland sous forme de béryllium 10, ce qui a permis d'en évaluer la puissance. La fréquence d'événements aussi violents pourrait être de 0,7 à 1,2 par siècle.
À la lecture des « Archives des journaux sur la météo spatiale »[3] on constate l'abondance de ces phénomènes solaires qui n'ont bien sûr pas tous la même importance.

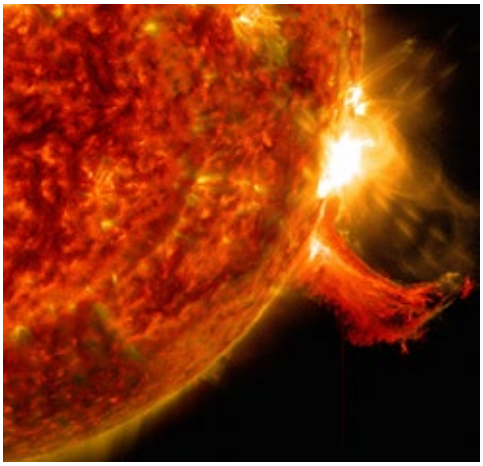
Intéressons-nous à quelques évènements marquants.

Octobre 1903

Cette tempête a eu la particularité de se produire pendant un minimum d'activité solaire. Elle possède la plus grande intensité connue pour une telle période. Elle a perturbé les communications de façon importante, d'énormes pics dans la tension des lignes téléphoniques ont été enregistrés à Chicago, et les systèmes télégraphiques ont été touchés à Londres. Cela démontre que les tempêtes solaires constituent une menace même lorsque l'activité solaire est faible.

2 Les astronomes classent les éruptions solaires en fonction de leur intensité en watts par mètre carré dans le domaine des rayons X compris entre 0,1 et 0,8 nanomètre. Il existe cinq catégories, repérées par les lettres A, B, C, M et X. Chaque catégorie correspond à une éruption d'une intensité 10 fois plus forte que la précédente. Chaque catégorie est subdivisée en neuf degrés. La catégorie X est ouverte. Ainsi, même s'il n'existe pas de lettres pour caractériser des éruptions 10, 100 ou 1 000 fois plus puissantes, on trouve alors des numéros pouvant aller bien au-delà de X9. La plus puissante éruption enregistrée à ce jour a saturé les capteurs au-delà de X28 (en octobre 2003).

3 http://www.solarstorms.org/SRefStorms.html



Éruption solaire capturée par le satellite SDO/ NASA en 2014 (crédits : NASA / SDO).

Mai 1921

Une étude reproduisant la chronologie des événements explique que la période de perturbation géomagnétique de mai 1921 peut être décrite comme une séquence de tempêtes, et non un événement solitaire. Selon certains experts, son ampleur était comparable à celle de l'événement de Carrington.

4 août 1972

Cette tempête se produisit entre les missions Apollo 16 et Apollo 17.
Classée X20, elle a fortement perturbé les réseaux électriques et de communication en Amérique du Nord. Elle a de plus surpris le commandement américain en provoquant l'explosion accidentelle de mines marines américaines au large du Nord-Vietnam[4]. Le nuage coronal a atteint la Terre en tout juste 14,6 heures (contre 2 à 3 jours en temps normal), c'est le temps de déplacement le plus rapide jamais enregistré (près de 2 900 km/s soit plus de 10 000 000 km/h) à cette date. Si un astronaute des missions Apollo avait réalisé une sortie extravéhiculaire sur la Lune à ce moment-là, il aurait été exposé à une dose de rayonnement sûrement mortelle.

4 D'après un document déclassifié de l'US Navy : https://vva.vietnam.ttu.edu/repositories/2/digital_objects/83295

Mars 1989

Le 9 mars 1989, une forte éruption solaire se produisit et projeta dans l'espace un nuage de plasma. Cette CME se dirigea vers la Terre à une vitesse de 500 km/s. Trois jours et demi plus tard, des variations anormales de tension furent observées sur le réseau électrique au Québec.
Le 13 mars 1989, le champ magnétique terrestre varia brusquement. À 2 h 44, les systèmes de protection du réseau électrique québécois se déclenchèrent et six millions de personnes furent privées d'électricité pendant 9 heures. La tempête géomagnétique provoquant une panne de courant majeure au Québec fera la une des journaux du monde entier. Le grand public découvrit le phénomène.
Au même moment, des aurores boréales furent visibles depuis le Texas ! Les ondes radio entre les USA et la Russie furent également brouillées.


Newspaper Headlines
May 15, 1921
SUNSPOT CREDITED WITH RAIL TIE-UP
New York Central Signal System Put Out of Service by Play of Northern Lights.
The sunspot which caused the brilliant aurora borealis on Saturday night and the worst electrical disturbance in memory on the telegraph systems was credited with an unprecedented thing at 7:04 o'clock yesterday morning, when the entire signal and switching system of the New York Central Railroad below 125th Street was put out of operation, followed by a fire in the control tower at Fifty-seventh Street and Park Avenue. This is the first time that a sunspot has been blamed for such a piece of mischief. From other accounts it appeared
SUNSPOT AURORA PARALYZES WIRES
Aurora Borealis Plays Tricks on Telegraph Wires
Electrical Experts Baffled by Extra Voltage from Air—Visible in Pennsylvania.
WIRES HIT BY THE AURORA BOREALIS
Telegraph Service Throughout United States Badly Crippled by Northern Lights—West and South Feel Effects Most—Reported as Brilliantly Visible Between Scranton and Pittsburgh.

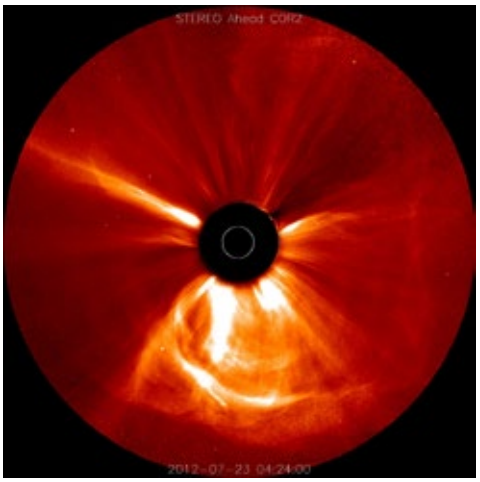
4 août 1972 : archives de journaux d'époque.

Halloween 2003

Les 22, 23 et 28 octobre 2003, de puissantes éruptions se produisirent à la surface du Soleil, estimées à X28. La vitesse des électrons et des protons émis par l'éruption dépassa les deux mille kilomètres par seconde ! Très rapidement, plusieurs vols transpolaires perdirent le contact radio pendant plus d'une heure. Près de 60 % des satellites, dont les sondes SoHO[5] (panne temporaire) et ACE[6], rencontrèrent des disfonctionnements (problème d'orbite, panneaux solaires dégradés...). Certains furent mis en mode sans échec pour les préserver. Les astronautes à bord de l'ISS durent se réfugier dans les parties les plus protégées du module russe, pour se prémunir contre l'augmentation des niveaux de rayonnement.
Sur Terre, douze transformateurs furent endommagés en Afrique du Sud, et en Suède la ville de Malmö fut plongée dans le noir pendant près d'une heure.
En avril 2004, Voyager 2 a également pu détecter les effets de cette tempête lorsque les particules chargées l'atteignirent.

Juillet 2012 : l'événement qui a raté la Terre !

Le 23 juillet 2012, la CME la plus rapide de l'histoire, a été observée par la sonde STEREO-A. Cette tempête solaire extrême a traversé l'orbite de la Terre… mais nous a manqué d'une semaine (elle a frappé de plein fouet la sonde).
Une nouvelle analyse des données de STEREO par des experts chinois et américains a révélé un scénario catastrophique. Si cette CME s'était produite une dizaine de jours plus tôt, cette tempête, aussi puissante que l'événement de Carrington, et deux fois plus intense que l'événement de 1989 ayant causé la panne au Québec, aurait pu causer une perturbation à grande échelle des systèmes de communication et de localisation par satellite ainsi que des pannes électriques généralisées. On estime que, si elle avait frappé la Terre, le montant des dégâts aurait pu atteindre 2 milliards de dollars US et qu'il nous aurait fallu des années pour nous en remettre.



Les sondes STEREO ont noté ce 23 juillet 2012, l'émission d'une CME géante s'éloignant du Soleil à la vitesse vertigineuse de 3 000 km/s.

4 février 2022

Le 3 février 2022 la société SpaceX lança 49 satellites de la constellation Starlinks depuis Cap Canaveral. Le 4 février une CME de faible intensité (classe G2)[7] frappa le champ magnétique terrestre. On constata alors un début de « désorbitation » des satellites. L'apport d'énergie dû à cette CME a chauffé la haute atmosphère de la Terre et a fortement augmenté la traînée aérodynamique des satellites. Ceux-ci orbitant à 210 km de la surface de la Terre (zone où il est facile de désorbiter un satellite) ont vu leur trajectoire modifiée et une quarantaine d'entre eux sont retombés dans l'atmosphère.

Des traces de tempêtes solaires plus anciennes

Ces évènements sont-ils particuliers, ou des évènements semblables se sont-ils déjà produits avant la première observation de Carrington ? Les protons énergétiques venant frapper l'ionosphère produisent des réactions nucléaires donnant naissance à des isotopes radioactifs : le carbone 14, le béryllium 10, le chlore 36. Des physiciens et des géologues ont cherché des traces d'éruptions solaires ayant touché la Terre dans les archives naturelles du passé de celle-ci que sont les cernes des arbres multi-centenaires ou les carottes de glace prélevées dans les couches de glace des glaciers du Groenland et de l'Antarctique qui renferment toute l'histoire de l'atmosphère terrestre.

Les événements Miyake

Année 775

En 2012, une équipe dirigée par la physicienne Fusa Miyake de l'université de Nagoya (Japon) découvrit dans les anneaux de croissance de deux cèdres du Japon une forte et rapide hausse de la concentration en carbone 14, correspondant à l'année 775 de notre ère. Elle attribua ce phénomène à un sursaut de rayons gamma sans doute dû à l'explosion d'une supernova non identifiée. D'autres relevés réalisés sur des arbres d'Amérique du Nord et d'Europe montrèrent un pic similaire, indiquant que le phénomène avait touché une bonne partie de l'hémisphère Nord.
En 2013, l'équipe d'Ilya Usoskin[8] (physicien) de l'université d'Oula en Finlande, après avoir mesuré la concentration en béryllium 10 pour l'an 775 dans des carottes de glace prélevées en Antarctique conclut qu'il s'agissait d'une tempête solaire qui pourrait correspondre à la plus forte éruption solaire connue à ce jour.

5 SoHO (Solar and Heliospheric Observatory) satellite NASA/ESA, observe le Soleil au point de Lagrange L1 depuis 1995.
6 Ace (Advanced Composition Explorer) satellite de la NASA étudie in situ les particules d'origine solaire, interplanétaire, interstellaire et galactique. Lancé en 1997, sa mission doit durer jusqu'en 2024.
7 D'après le « Space weather prediction center de la NASA ».
8 Publié dans Astronomie et Astrophysique en 2013.

En 2015, l'équipe du professeur Raimund Muscheler (géologue)[9] de l'université de Lund en Suède, après avoir mesuré simultanément les concentrations des trois isotopes carbone 14, béryllium 10 et chlore 36 dans des carottes de glace prélevées au Groenland et avoir comparé ces taux à ceux observés lors d'éruptions solaires récentes, confirma que le phénomène repéré en 775 était bien une tempête solaire plus puissante que celle observée par Carrington.
D'autres pics de carbone 14 ont été repérés dans les cernes des arbres en 993 de notre ère et en –663, –5263, –5410, –7176. Ces évènements ont été appelés évènements Miyake.



Fusa Miyake près d'un morceau de bois de cèdre dont elle étudie les anneaux (source : Université de Nagoya).

Année 993

En 2017, l'équipe de Hisashi Hayakawa[10], de l'Université de Nagoya confirma l'hypothèse d'une forte tempête solaire pour l'année 993 de notre ère. D'anciens manuscrits indiquent aussi huit observations d'aurores en Saxe, dans le nord de l'Irlande et dans la péninsule coréenne à cette période

La super-éruption de –660

L'analyse de carottes de glace du Groenland faite par l'équipe internationale de Pascal O'Hare (géologue) de l'université de Lund en 2019[11] a montré une très forte augmentation des taux de carbone 14, béryllium 10 et chlore 36 en −660. Il s'agirait d'un évènement aussi important que celui de 775.

Il y a 9200 ans, en –7176

Après avoir prélevé et analysé des carottes de glace au Groenland et en Antarctique l'équipe du professeur R. Muscheler cité plus haut a repéré des pics importants de béryllium 10 et de chlore 36. Ces pics ont été datés en −7176. Cela correspondrait à une tempête solaire de classe X qui selon les chercheurs serait dévastatrice si elle se produisait de nos jours. Les résultats ont été publiés le 11 janvier 2022 dans la revue «*Nature Communications*». Il semblerait que cette éruption solaire ait eu lieu pendant un minimum solaire mais cela est encore un sujet de débat.

Et dans le futur ?

Il semble donc évident que des « super-tempêtes » solaires sont appelées à se reproduire dans un futur proche ou lointain. Pour une société comme la nôtre, multi-connectée et dépendant des communications internet, le danger des colères solaires est entier. Bien sûr nous avons appris des évènements récents. Ainsi il est possible d'isoler électriquement certaines zones des circuits électriques et donc d'éviter la propagation d'une surcharge locale et la panne générale. De même il est possible de mettre les satellites en mode de protection leur permettant de ne pas subir directement les effets du plasma solaire.
Mais pour que ces précautions puissent être prises, il est nécessaire que l'alerte soit donnée suffisamment tôt. Les techniciens sur Terre n'ont que quelques heures pour mettre nos moyens de communication et de transport d'énergie électrique en sécurité à partir du moment où le phénomène est détecté à la surface du Soleil. Une surveillance permanente et active du Soleil est donc mise en place via les satellites SoHO, STEREO B, SDO etc. Mais il est nécessaire de continuer les recherches pour mieux comprendre l'origine de ces phénomènes et développer une véritable « météo solaire » ce que s'emploient à mettre en œuvre les instituts internationaux tels Space Weather Prediction Center (SWPC) réunissant des collaborations internationales. Enfin les satellites « Parker Solar Probe », lancé le 12 août 2018 qui orbite autour du Soleil très près de la couronne solaire et « Solar Orbiter » lancé le 10 février 2020, devraient nous apporter leur moisson d'observations qu'il restera bien sûr à comprendre pour mieux prévoir l'activité solaire.

■

Pour plus de détails voir :
- Hors-série n° 14 du CLEA *Le Soleil*.
- Complément au HS14 sur le site du CLEA annexe 10 « des vidéos solaires » en particulier.
- *NASA A First for IRIS Observing a Gigantic Solar Eruption.*
- *NASA Highlights from SOHO's 20 Years in Space.*
- *Hinode 10th Anniversary of Its Launch.*
- *Météorologie de l'espace* de J. Lilensten, F. Pitout, M. Gruet et J.P. Marques édition de Boeck (2021).

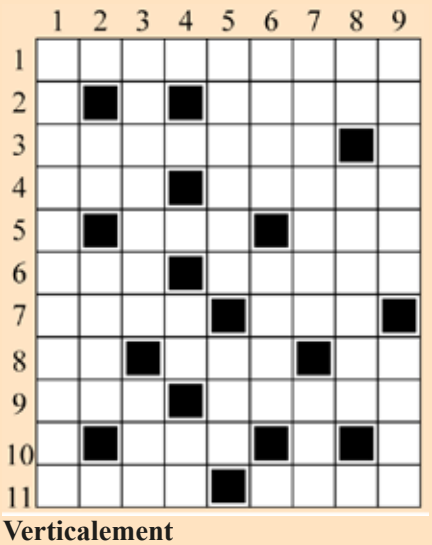
9 Publié dans Nature en 2015 : Multiradionuclide evidence for the solar origin of the cosmic-ray events of AD 774/5 and 993/4
10 Étude publiée dans la revue «Solar Physics» en 2017.
11 Proceedings of the National Academy of Science (March 11, 2019).

Le Soleil dans les productions du Clea

Le hors-série n° 14 des Cahiers Clairaut, Le Soleil, porte entièrement sur le sujet.

Dans les anciens numéros des Cahiers Clairaut (http://clea-astro.eu/archives).
(tous les numéros de plus de 3 ans sont en libre accès sur notre site clea-astro.eu, archives des CC.
Une bonne partie de ces articles sont notés avec un lien sur l'onglet Lunap/Soleil du site clea-astro.eu).
Mesure de la rotation du Soleil par effet Doppler, CC 161 (2018), CAMPI Xavier.
Le Soleil, notions de base, CC 143 (2013), CAUSERET Pierre.
L'origine de l'énergie solaire, CC 143 (2013), FADEL Kamil.
Une étude du Soleil au lycée, CC 143 (2013), STORTZ Bertrand.
Maquette Tournesol, comprendre et visualiser les rotations du Soleil et de la Terre, CC 143 (2013), MERLIN Philippe.
Poursuite de l'exploration du Soleil à l'aide de Geogebra, CC 143 (2013), THIAULT Sylvie.
Imagerie solaire, CC 143 (2013), MEUNIER Roger.
Dis-moi, le Soleil qu'est-ce que c'est ? CC 143 (2013), BILLARD Francine, GRAUSS Bernard.
Relations Terre-Soleil, CC 141-142 (2013), PITOUT Frédéric.
Étude des taches solaires à l'aide de GeoGebra, CC 136 (2011), THIAULT Sylvie.
Observation du Soleil, CC 128 (2009), MEUNIER Roger.
Quelle est la couleur du Soleil ? CC 132 (2010), CAUSERET Pierre.
Galilée et la rotation du Soleil, CC 124 (2008), BERTHOMIEU Francis.
Propositions de travaux sur le Soleil, CC 122 (2008), MEUNIER Roger.
Observation des tâches solaires et vitesse de rotation CC 120 (2007), LECOUTRE Chantal, LECOUTRE Georges.
Mesurer la puissance du Soleil, CC 104 (2003), ACKER Agnès.
Les aurores polaires, CC 103 (2003), LARCHER, Christian.
Sur l'histoire des taches solaires, CC 92 (2000), MIZAR K.
Et pourtant il tourne, CC 82 (1998), LACOUR Bernard.
La classe au Soleil, CC 80-81 (1997 1998), PECKER Jean-Claude.
Énergie solaire et durée de vie du Soleil, CC 10 (1980), ACKER Agnès.

Sur le site du CLEA (http://www.clea-astro.eu), onglet lunap
Vous trouverez des infos ainsi que des liens vers des anciens articles en cliquant sur le terme Soleil.



Mots croisés Soleil

Horizontalement

1. Important constituant du Soleil.
2. Il sait tisser.
3. On peut l'utiliser pour observer le Soleil mais avec des précautions.
4. On l'a déjà photographiée devant le Soleil. Pris l'air.
5. Important constituant du Soleil. Carburant.
6. Bête. Unité de Delambre et Méchain.
7. Un sixième de la précédente. Opus ni musical ni tolérant.
8. Important constituant du Soleil. Celui du Soleil est de 4,57 Ga. Aux bouts du doigt.
9. Elle a participé à la conception de Solar Orbiter. En forme de Soleil.
10. On trouve ses grains à la surface du Soleil.
11. Il y en a une sur le Soleil au musée Marmottan en ce moment. Râ pour le Soleil.

Verticalement

1. Le domaine du Soleil.
2. Patrie de la sonde solaire Parker. Bêtes et naïves.
3. Celle du Soleil est de 1,4. Astronome américain ou artiste dadaïste.
4. Dix m² ou 218. Il abrite des volcans.
5. Petite constellation importante dans l'hémisphère sud. Important constituant du Soleil.
6. Comblé ou pourri. Il y en a eu plusieurs au Soleil dont une d'Edmond Rostand.
7. Son origine dans le Soleil : la fusion. Choix.
8. Sans effet. Périhélie ou aphélie.
9. Soleil. Coronal sur le Soleil ou noir au centre de la Galaxie.

Solution p. 44

ON A ADOPTÉ UN SOL'EX !

JB Butet et ses élèves du lycée Lalande de Bourg-en-Bresse
(Léo, Lucie, Eva, Lucile, Tiff, Lilou, Adrien, Erwan, Mathis, Alexandre, Johan, Gwenhaël, Etienne, Estelle)

Sol'Ex (Solar Explorer) est un petit spectrohéliographe que l'on peut construire en partie à l'aide d'une imprimante 3D et en utilisant quelques éléments de base achetés dans le commerce.

Nous sommes dans un lycée napoléonien situé au cœur de la Bresse à Bourg-en-Bresse, pays du poulet et du maïs qui a vu passer quelques noms illustres comme Jérôme Lalande et André-Marie Ampère à qui on doit une grande partie de notre « musée »[1] interne au lycée.

Pour ma part, j'y enseigne depuis 2006 et y maintiens un club sciences/astronomie dont plusieurs projets vont arriver à la mise en œuvre (Système solaire à l'échelle dans la cour, maquettes diverses etc.) et je suis astronome amateur depuis que j'enseigne, complètement subjugué par la vision de Saturne à la webcam en 2001 lors de mon stage en Bretagne quand Bruno Garin, un de nos formateurs, a mis sa ToUcam Pro derrière son C8 et projeté l'image obtenue sur un mur de l'IUFM.

Passionné d'informatique depuis petit, cela a fait le déclic et j'ai depuis consacré une bonne partie de mon temps à allier informatique et astronomie. Certains projets ont eu leurs petits succès en leur temps (une distribution Linux dédiée à l'informatique : lin4astro et quelques contributions de ci, de là)

En septembre 2020, Christian Buil, figure très connue dans le monde de l'astronomie amateur (contribution à la conception de la première CCD pour amateur, l'Audine ; mise au point de divers spectroscope LISA, ALPY, UVEX, LHIRES… ; créateur de logiciels divers : IRIS, ISIS…) a lancé le projet Sol'Ex (Solar Explorer) qui consiste à monter un spectrohéliographe avec une carène imprimée en 3D [2].

Grâce à la mise à disposition de toute une documentation très fournie, j'ai proposé à mes élèves de créer ce Sol'Ex. En novembre nous lancions une campagne de dons pour acheter ce que nous ne pouvions imprimer -l'optique-. En avril, nous avions de quoi le finaliser.

Heureusement pour nous, nous avions déjà du matériel prêté par Sciences à l'École (dotation Astro à l'École, 2013), notamment un réfracteur de 600 mm de focale.

Composition

Le Sol'Ex est composé optiquement d'une fente, de deux doublets et d'un réseau très dispersif (2 400 traits/mm). Ce kit est commandable chez Shelyak[3] pour environ 450 €.

Il faut aussi un système pour enlever une grande partie du flux solaire. Nous avons opté pour un hélioscope (système basé sur un prisme de Herschel) mais d'autres systèmes peuvent être adapté (comme des filtres neutres[4]).
L'idée est d'avoir assez de flux pour imager mais pas trop pour ne pas endommager le capteur.

Le tout est mis dans un caisson imprimé en 3D en PETG (plastique solide et peu transparent aux IR en particulier).

Le lycée s'était doté récemment d'une imprimante 3D, nous avons pu commencer l'impression des pièces entre octobre et décembre.
Il a fallu attendre un peu pour finaliser la campagne de dons. Nous avons pu récolter un millier d'euros et acheter le kit optique et une caméra adaptée (CMOS N&B très rapide, ZWO 178 mm).

Derrière la lunette, il faut donc dans l'ordre :
- le filtre de Hershell (filtre 96 % de la lumière du Soleil) ;
- le Sol'Ex ;
- la caméra.

1 http://www.aseiste.org/ : tout notre inventaire y est répertorié.
2 Description détaillée disponible sur le site http://www.astro-surf.com/solex/
3 Shelyak instruments, https://www.shelyak.com/
4 Filtres de densité adaptée, laissant passer plus de lumière que les filtres pour l'observation visuelle.



Réglages

Le dispositif Sol'Ex se met derrière une lunette ou un objectif de courte focale (< 450 mm) [5]. Il y a donc 3 éléments optiques nécessitant une mise au point :

- la crémaillère de la lunette permet de mettre l'image du Soleil sur la fente ;
- le premier doublet permet de mettre l'image de la fente à l'infini sur le réseau ;
- le deuxième doublet permet de focaliser les rayons parallèles sortants du réseau sur la caméra.

Tout ceci fait qu'un protocole précis de réglage doit être suivi scrupuleusement. Même si nous sommes rodés, nous avons pu nous confronter à des réglages précis et les soucis qui vont avec :

- les soucis d'orientation du réseau (ce qui a failli nous faire renvoyer le kit… nous avions monté le réseau à l'envers) ;
- la visserie dans le plastique – dont les filetages sont fragiles ;
- des mises au point particulièrement fines… au pouillème près !

Ces réglages ont permis aux élèves d'apprendre la rigueur du montage (suivi de protocole long) et aussi la patience pour les réglages très fins.

Comment cela fonctionne ?

L'idée est de prendre une photo d'un bout du spectre du Soleil et d'aller chercher les informations dans la bande d'absorption souhaitée. Ainsi on peut imager en H alpha, dans une raie du calcium, du fer…
Pour le moment, nous nous sommes juste contentés de faire des images en H alpha.
Une fois la bande H alpha repérée, il faut placer la fente sur le Soleil.

5 Avec deux contraintes : un dispositif de mise au point assez précis, et un tirage optique (distance disponible entre l'arrière de l'instrument et le plan focal) suffisant pour que l'image puisse se former sur la fente.

On aura alors sur la caméra, dans la bande souhaitée, les informations de cette tranche de Soleil.
Il faut donc faire défiler le Soleil sur la fente et compiler ces informations pour avoir l'image du Soleil en entier. Notre lunette ayant une focale un peu longue, il faut faire 2 passes pour avoir le Soleil en entier en décalant le retour.

Ceci pose divers problèmes :

- comment viser le Soleil sans voir la fente et en ne voyant qu'un bout de spectre ?
- comment savoir si on est au point ?
- comment être sûr d'avoir orienté convenablement…

Toutes ces questions sont fondamentales pour obtenir un résultat satisfaisant… d'autant qu'on ne découvre le résultat qu'après une étape de traitement informatique consistant à prendre le centre de la bande d'absorption et à l'accoler à la précédente, le tout pour toutes les images d'un film qui en comporte 2 000.

Comme le Soleil passe dans la fente, on recrée ainsi l'image du Soleil, ligne par ligne, informatiquement.

Obtenir une image en bonne résolution du Soleil nécessite d'avoir réglé beaucoup de problèmes techniques. Une fois ceux-ci résolus, l'étape informatique est très simple, grâce à un logiciel développé par Valérie Desnoux, INTI[6].

6 INTI et son écosystème : http://valerie.desnoux.free.fr/inti/index.html



J'ai participé aux tout débuts d'INTI et proposé quelques modifications mineures. Ce logiciel est en constante amélioration et il en existe d'autres qui ont d'autres avantages. INTI reste la valeur sûre.

Sans rentrer dans les détails mathématiques, ce logiciel calcule la position de la raie d'absorption, récupère les positions et valeurs des pixels situés dans la raie pour chacune des images, les met sous forme d'une ligne (il y a une déformation inhérente à l'optique qui fait que l'image d'une raie est une parabole) puis accole ces lignes pour former une image.
On obtient alors une image brute, non traitée, et déformée. Déformée car le nombre de lignes qui dépend de la vitesse de parcours de la fente n'est pas forcément égale au nombre de colonnes, donc on a une sorte de « patatoïde »[7].

À ce « patatoïde », on doit enlever un bruit qui correspond au défaut de la fente et qui forme une trame peu jolie : le « transversalium ».

Si on rajoute à cela que le défilement du Soleil est rarement orienté convenablement par rapport à la fente (il faut du temps pour cela et nous en avons rarement lors de nos séances), on obtient un gros « patatoïde » tourné qu'il faut rendre circulaire. Et ceci c'est si on a le Soleil en entier. Mais nous n'avons qu'une portion de Soleil, donc un « patatoïde » tourné tronqué. Et il faut faire tenir cela dans un cercle !
On comprend aisément que tout ceci n'est pas trivial… Heureusement, grâce à INTI, tout est automatique. OUF !

Il y a plusieurs versions de ce logiciel. Une qui a été initialement développée par Valérie Desnoux, et une qui est partie de ce travail titanesque pour donner une version dont les traitements diffèrent un peu, notamment sur la circularisation, la version -the Smiths-.[8]

7 On peut chercher un couple «vitesse de balayage - fréquence de prises de vues» permettant de s'approcher d'un cercle.
8 Solex_ser_recon : https://github.com/thelondonsmiths/Solex_ser_recon_EN

Comment se passe une séance ?

Nous avons des créneaux d'une heure et demi, entre 12 h 30 et 14 h. La lunette est prémontée, toujours sur sa monture. En hiver, nous observons derrière la fenêtre. En été, nous la descendons.
La lunette est une Skywatcher 80/600 montée sur une EQ3-2 motorisée (GOTO) – dotation sciences à l'école 2013.

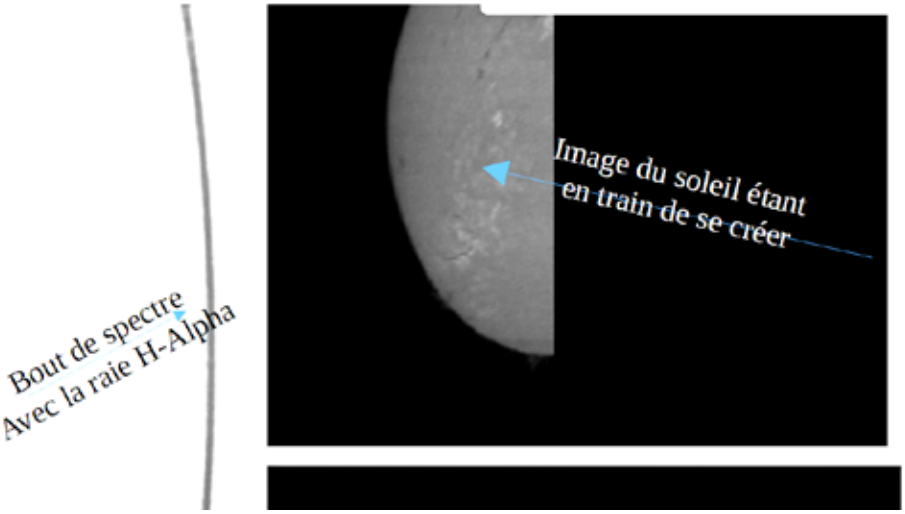
Nous réglons rapidement le Sol'Ex au bureau en visant le ciel le temps qu'un groupe règle la lunette – mise en station rapide. Un bon point : les réglages ne se défont pas trop. Sauf s'il est mal manipulé.

Puis on cherche le Soleil. Nous avions un chercheur solaire imprimé en 3D, mais il a très vite montré des faiblesses et notre protocole est assez efficace pour trouver le Soleil en moins de 3 minutes :

- la mise en station est sommaire, le lycée est orienté Nord/Sud on s'aligne avec les bâtiments ;
- on aligne la lunette à la main pour minimiser l'ombre de la lunette ;
- on monte le gain de la caméra puis on joue sur les moteurs de manière à gagner en luminosité sur un axe. Quand on arrive à un maximum, on change d'axe. En 2 itérations, on tombe sur le Soleil et on sature la caméra que l'on règle correctement ;
- on fait alors la mise au point en regardant les hétérogénéités dans la raie.

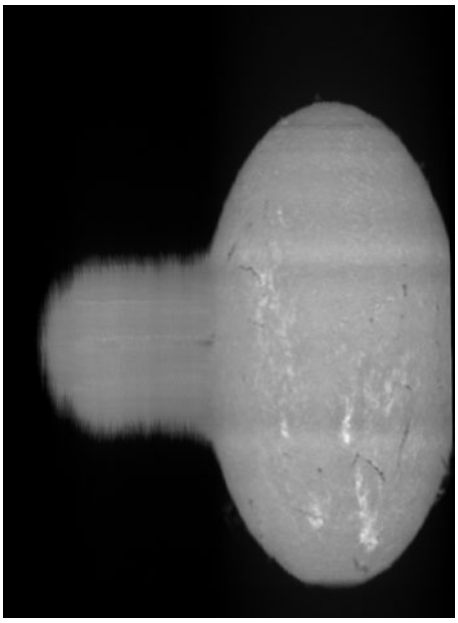
Nos réglages : La caméra permet d'avoir environ 150 images par seconde. Nous devons donc, avec notre lunette, faire défiler le Soleil en 12-14 secondes pour avoir environ 2 000 images soit 2 000 colonnes de pixels. Un sur-échantillonnage est très mauvais pour la qualité finale de l'image.

Ceci s'obtient avec un temps de pose de 6,5 ms pour la caméra et une vitesse de balayage en « rate 3 » pour la monture.

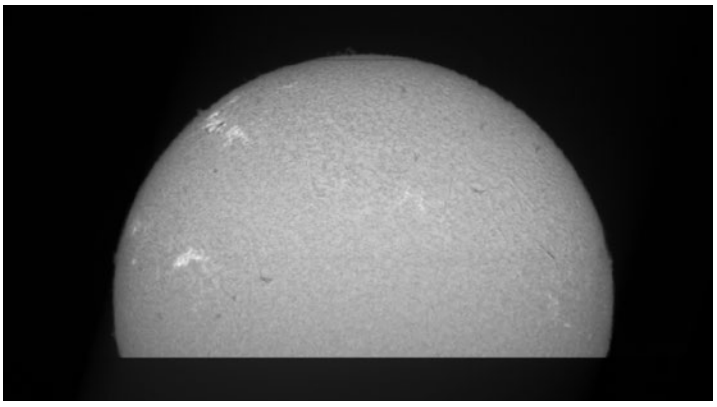


Et nos résultats ?

Pour le moment, difficile de parler de « résultats ». Nous arrivons à imager le Soleil dans une qualité assez correcte. Mais nous manquons de temps pour améliorer. Un spectrohéliographe est très sensible à la turbulence et il faudrait prendre notre temps, passer quelques heures pour trouver les trous de turbulences.
Cependant, on devine aisément les protubérances, les filaments.



Une image où le moteur a cahoté avant de partir correctement.

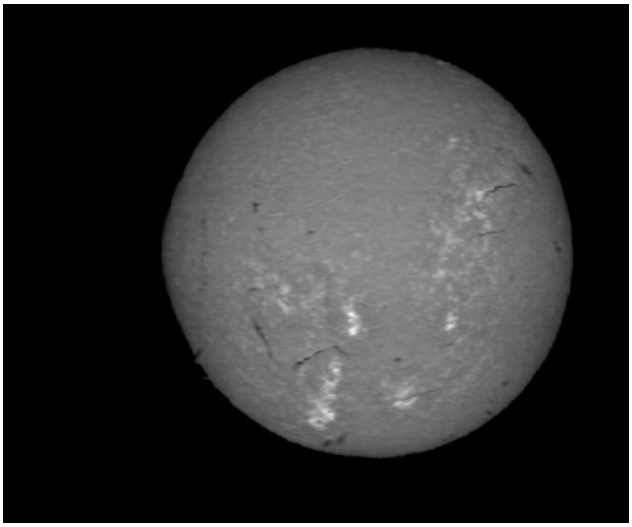


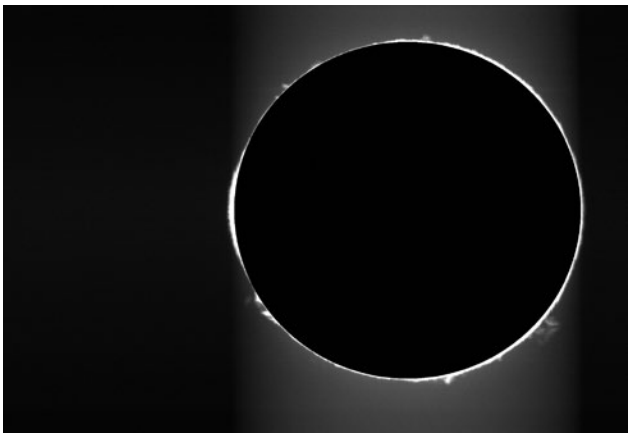


Quelques images réussies .

Quelles manipulations possibles ?

Actuellement, nous n'en sommes qu'à l'imagerie dans une raie très visible et reconnaissable. Nous pourrions changer de longueur d'onde pour aller imager dans la zone de la raie du calcium, ce qui donne d'autres informations. La prochaine manipulation sera sans doute l'imagerie dans la raie de l'hélium, très peu visible. Il s'agit de la trouver – pour cela, on traite des images au limbe, de la chromosphère, là où l'hélium émet et la raie apparaît – puis d'imager et de traiter à cet endroit-là particulièrement.





Les images complètes du Soleil ont été prises avec un réducteur de focale × 0,5, mais le résultat n'est pas concluant quant à la mise au point. L'image reste assez floue.
Les autres images ont été prises, directement avec la lunette de 600 mm de focale.

Une fois cette manip faite, on pourra imager dans la zone de la raie du fer et déduire des informations magnétiques de la surface, mais cela demande beaucoup de temps et une météo très favorable.

Conclusion

Ce projet est une mine d'or. Il nous a permis de mettre en œuvre des compétences sociales (demandes de dons, mise en place d'actions de financement – nous avions à cœur d'être indépendants) mais aussi techniques et bien sûr scientifiques.

Après un an et demi, nous en sommes encore à maîtriser la bête, pourtant les élèves arrivent de manière autonome à imager le Soleil.

Nous avons une pièce à modifier qui tient mal et nous embête (le scotch noir est notre ami pour le moment…) et nous allons présenter notre projet aux olympiades de physique.

Il nous faut maintenant quelques journées de soleil pour améliorer notre technique et faire de jolies acquisitions, comme la possibilité d'imager dans la raie de l'hélium… ce qui serait un véritable défi expérimental.

Mathis GAUDILLAT et Alexandre ADOSHVILI ont souhaité porter ce projet aux olympiades de physique 2022. Ils présenteront leurs résultats dans un prochain numéro des Cahiers Clairaut.

■



L'équipe du club astro du lycée Lalande.

N'hésitez pas à aller sur le site de Christian Buil (http://www.astrosurf.com/solex/), tout y est rigoureusement expliqué et vous y trouverez les coordonnées d'une liste de diffusion extrêmement dynamique consacrée à ce projet.

IMPRESSION SOLEIL LEVANT
TABLEAU DE CLAUDE MONET
LE PROBLÈME DE SA DATATION

Christian Larcher

En 2022, le musée Marmottan Monet célèbre les 150 ans du fleuron de ses collections, Impression, soleil levant et lui rend hommage à travers l'exposition « Face au Soleil, un astre dans les arts » du 21 septembre 2022 au 29 janvier 2023. C'est dans ce contexte que se situe cet article pour le dossier Soleil de ce numéro.



Claude Monet *Impression soleil levant* 1872 © ADAGP, Paris 2022.

Deux discussions relatives au tableau de Claude Monet ont déjà fait couler beaucoup d'encre :

- dès son entrée dans la sphère publique, une discussion d'ordre artistique concernant la naissance de l'« impressionnisme » suite au nom « impression » donné par le peintre Claude Monet à son tableau a été lancée. C'est une nouvelle façon de peindre qui fait débat ;
- les variantes de ce nom (impression soleil couchant, impression soleil levant) qui ont été utilisées dans les différents ouvrages jusqu'à se fixer en 1965 sur impression, soleil levant, ont fait plus récemment naître l'idée d'une démarche d'enquête pour argumenter l'un ou l'autre de ces titres. Pour savoir s'il s'agit d'un lever de Soleil ou d'un coucher de Soleil, il faut déterminer l'heure et la date de la réalisation du tableau ce qui conduit à mettre en œuvre une investigation scientifique articulant données historiques, astronomiques et météorologiques.

C'est cette seconde discussion dont nous allons ici présenter les éléments et les résultats en nous appuyant sur un ensemble d'articles référencés.
Notons que ce type d'enquête a été également réalisé sur différents tableaux.

L'intervalle pour la datation est assez retreint 1872-1873, mais pour préciser l'heure et la date de réalisation du tableau de Monet il a fallu retrouver :

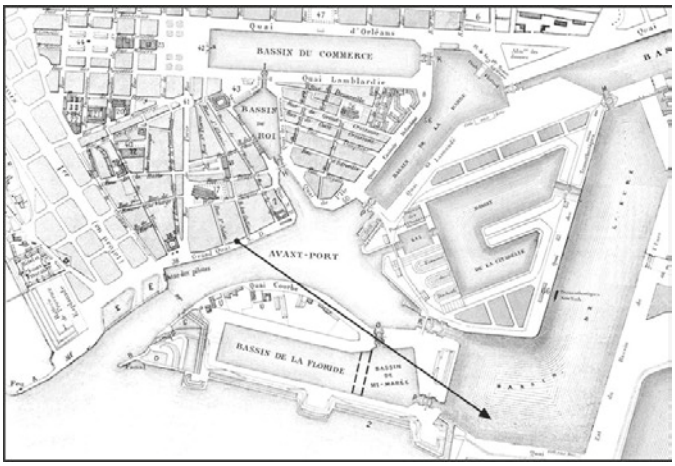
- le lieu d'où Monet a observé et représenté et ce qu'il voyait ;

- les caractéristiques à cette époque du port représenté ;
- repérer les détails qui peuvent être utiles pour en déduire l'angle sous lequel le Soleil se trouvait par rapport au nord et sa hauteur dans le ciel sur l'image figée que nous avons sous les yeux ;
- en déduire la ou les dates compatibles avec ces informations ;
- retrouver les archives qui permettent de connaître la météo à ces dates pour restreindre le nombre de dates possibles.

Tout d'abord, on sait que Monet avait ses habitudes au Havre, à l'hôtel de l'amirauté, situé « grand quai » rebaptisé actuellement quai Southampton ; l'image suivante (Géoportail) permet de localiser le point d'observation de Monet.



Quai Southampton ligne blanche en bordure nord du port, orientée sud ouest/nord est.



La flèche indique la vue qu'avait Monet sur le port.

Le travail des enquêteurs a permis de préciser la position du Soleil par rapport à la direction nord sud : sur la carte du port au 19e siècle, la ligne de vision depuis l'hôtel de l'amirauté jusqu'à l'extrémité est du quai courbe pointe fait un angle de 122° par rapport au nord géographique ; mais il faut préciser la position du Soleil représenté sur le tableau par rapport à la ligne de vision et passer de la position du Soleil au moment où il est représenté à sa position au moment précis de son passage à l'horizon, seule donnée astronomique accessible. Les enquêteurs ont donné comme marge entre 123° et 127° pour ce passage.
Il s'agit bien d'un lever de Soleil (celui-ci est à l'est du méridien passant par l'hôtel) et le Soleil ne se lève que deux fois dans l'année dans cette marge, proche du solstice d'hiver, à mi-novembre et fin-janvier.
Si on s'intéresse à l'heure de ce lever du Soleil, il faut connaître la hauteur de celui-ci dans le ciel ; on peut utiliser deux informations :

- en utilisant le diamètre apparent du Soleil (1/2 degré), on le situe sur le tableau à 2° au-dessus de l'horizon ;
- en utilisant la hauteur des mâts des voiliers dans le bassin de mi-marée, connaissant la distance entre l'hôtel et le centre du bassin de mi-marée (550 m) ainsi que la hauteur du balcon de Monet (9 m au-dessus du quai) on estime à 4° au-dessus de l'horizon le haut des mâts donc à plutôt 3° la hauteur du Soleil.

Cette valeur est compatible avec un intervalle de 23 à 30 minutes après le lever du Soleil.

Il s'agit donc d'un lever de Soleil à mi-novembre ou fin janvier année 1872 ou 1873 ; représenté environ 25 minutes après le lever du Soleil.
Comment aller plus loin ? La consultation de l'annuaire des marées va permettre de cerner les dates possibles. En effet, les voiliers tirés par des remorqueurs ne pouvaient accéder à l'avant-port du Havre que durant 3 à 4 heures au moment de la marée haute. Avec l'annuaire des marées, d'après l'analyse topographique et à l'aide de calculs astronomiques sur la position de Soleil, les enquêteurs ont sélectionné quatre courtes périodes possibles :

21-25 janvier 1972 entre 8 h et 8 h 10 ;
11-15 novembre 1872 entre 7 h 25 et 7 h 35 ;
25-26 janvier 1873 à 8 h 05 ;
14-20 novembre 1873 entre 7 h 30 et 7 h 40.

Encore faut-il que le Soleil soit visible à la période concernée ! Il faut donc cette fois aller chercher des données météorologiques archivées. Ce sont les données quotidiennes à 8 h du matin (heure proche du lever de Soleil sur la période concernée) publiées par *The Times* et par le bulletin international de l'observatoire de Paris qui ont été utilisées.
Les dates 23 - 24 - 25 janvier 1872 peuvent être écartées car une violente tempête est signalée ; de même pour les 3 dates comprises entre les 11 et 15 novembre ;
Par contre le 21 janvier 1872 l'observateur du Havre note des vents faibles, une mer clapoteuse et un ciel nuageux couvert ; de même pour le 22 janvier 1872 ; puis conditions favorables pour le 13 novembre 1872 à 8 h avec un brouillard signalé et le 15 novembre 1872 avec brume.
Pour 1873 les données météo font retenir deux dates possibles : 25 janvier 1873 à 8 h vent faible et mer calme avec temps brumeux, de même pour le 26 janvier 1873.
Reste donc six dates sur les huit dates retenues antérieurement.
Un autre indicateur peut encore être utilisé : le panache de fumée visible sur le côté gauche du tableau.
La fumée semble dériver de la gauche vers la droite ce

qui indique un vent soufflant de l'est. Cette remarque n'est compatible, d'après les données météorologiques, qu'avec les dates du 13 novembre 1872 et 25 janvier 1873.
Il ne reste donc que ces deux dates possibles.
La préférence va au 13 novembre 1872, étant donné que cette année a été portée par Monet à côté de sa signature, même si elle a été parfois contestée.

Références

https://www.connaissancedesarts.com/artistes/claude-monet/impression-soleil-levant-lexposition-hommage-au-tableau-mythique-de-monet-en-5-chefs-doeuvre-eblouissants-11177186/

http://havraisdire2.canalblog.com/archives/2019/06/23/37426559.html

https://www.cineclubdecaen.com/peinture/peintres/monet/impressionsoleillevant.htm

https://www.lepoint.fr/arts/impression-soleil-levant-aux-origines-du-chef-d-oeuvre-de-monet-19-09-2014-1864700_36.php

https://www.france-memoire.fr/wp-content/uploads/2022/05/DP.pdf
(dossier de presse musée Marmottan David W Olson)

https://www.cineclubdecaen.com/peinture/peintres/monet/impressionsoleillevant.htm

http://www.muma-lehavre.fr/fr/expositions/impressions-soleil
Développe l'évolution de l'aspect artistique des œuvres de représentation du Soleil, un modèle évoluant à chaque instant.

■

ÉTUDE D'UN TABLEAU DE DERAIN

Pierre Causeret



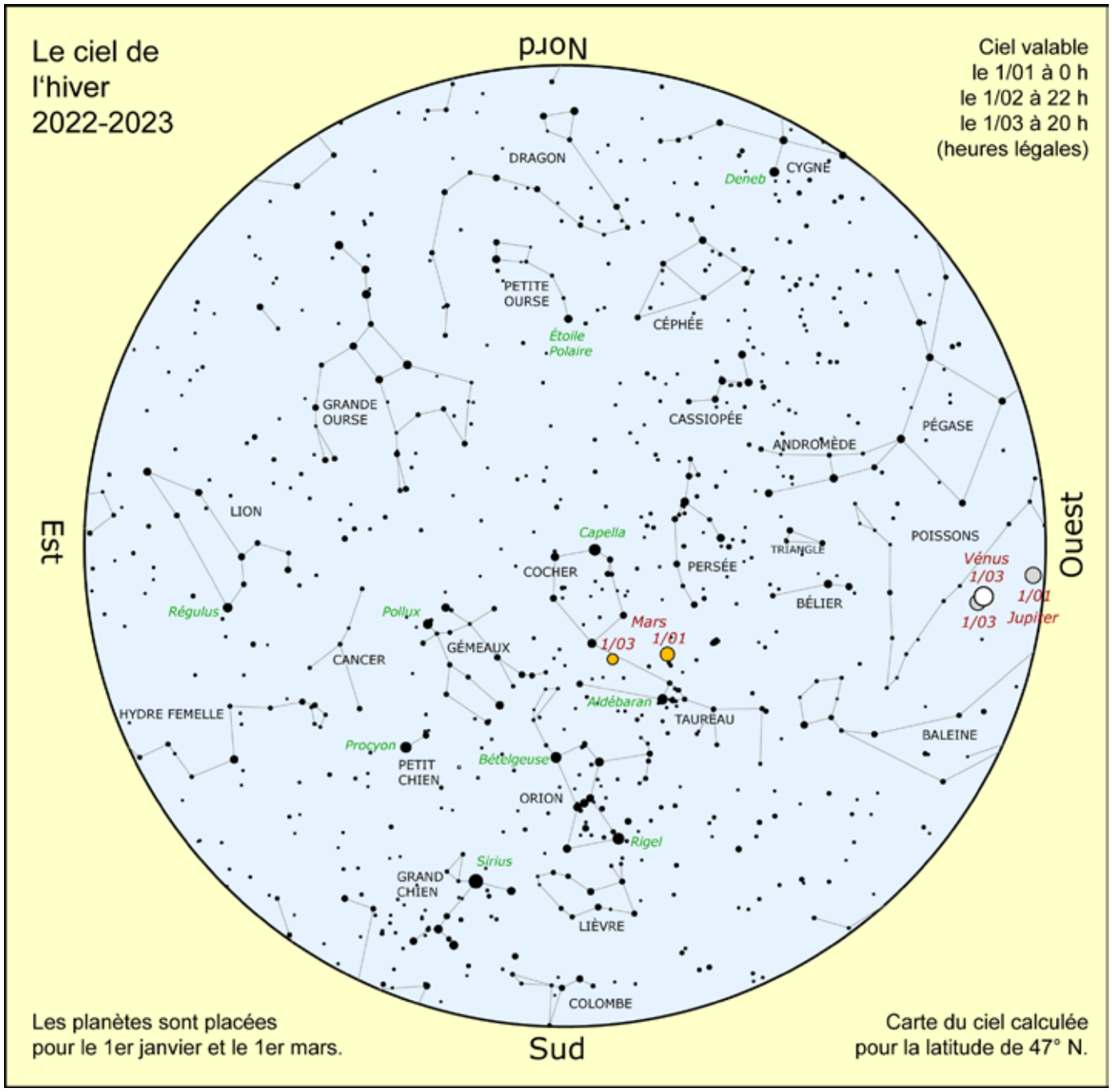
Fig.1. **Big Ben, André Derain, 1906 (© ADAGP, Paris 2022).**



Fig.2. **Vue de Big Ben depuis la position supposée de Derain (Google Earth).**

Ce tableau de Derain est actuellement présenté au musée Marmottan à Paris dans le cadre de l'exposition « Face au Soleil, un astre dans les arts ».
On peut se poser les mêmes questions que pour le tableau de Monet : est-on le matin ou l'après-midi ? Et quand ce tableau a-t-il été peint ?
Il faut tout d'abord essayer de retrouver où s'était installé Derain pour peindre ce paysage urbain, en supposant qu'il a représenté assez fidèlement ce qu'il voyait. Le mieux serait d'aller vérifier sur place mais on peut maintenant voyager sans se déplacer avec des logiciels comme Google Earth. On cherche le meilleur emplacement pour que ce que l'on voit ressemble au mieux au tableau, sans tenir compte pour l'instant du Soleil. Il semble que Derain était simplement sur l'autre rive de la Tamise, à proximité du pont (figure 2).
On peut calculer sous quel angle on voit la tour de l'Horloge (Elizabeth Tower) sachant qu'elle mesure 96 m de haut et qu'elle est située à environ 350 m (distance obtenue avec un plan de Londres) : on trouve 15°. On peut ensuite estimer la hauteur du Soleil au dessus de l'horizon sur le tableau de Derain à 14° environ.
Sur un plan, il apparaît clairement que le Soleil était du côté ouest, on est donc l'après-midi.
Toujours avec un plan, on trouve que l'azimut du Soleil était d'environ 82° (compté à partir du sud). Connaisssant la latitude de Londres, on peut chercher à quelle date et à quelle heure le Soleil se trouve dans cette direction et à cette hauteur avec un logiciel comme Stellarium. Les 5-6 avril ou 7-8 septembre vers 17 h conviennent. On peut donc penser que **Derain a peint ce tableau début avril ou début septembre aux alentours de 17 h TU**.
Pour être plus précis, il faudrait prendre des mesures sur place.

■



Visibilité des planètes

Mercure est visible le matin fin janvier au sud-est et le soir fin mars à l'ouest (mais ce sera mieux début avril).
Vénus est arrivée dans le ciel du soir et s'éloigne angulairement du Soleil. Beau rapprochement avec Jupiter début mars.
Après son opposition de décembre, **Mars** reste bien visible le soir dans le Taureau mais son diamètre apparent et sa luminosité diminuent au cours de l'hiver.
Jupiter est à observer le soir mais elle se couche de plus en plus tôt.
Saturne passe derrière le Soleil mi février. On peut encore la trouver au tout début de l'hiver le soir à l'ouest.
Uranus est dans le Bélier et Neptune dans le Verseau et les Poissons.

Quelques évènements (heures légales)

21/12 : solstice d'hiver à 22 h 48 min.
22/12 : maximum des Ursides (étoiles filantes).
1/01 (23 h) : rapprochement Lune - Uranus (0,7°).
3/01 (20 h) : rapprochement Lune - Mars (< 1°).
4/01 : maximum des Quadrantides (étoiles filantes).
4/01 : la Terre passe au périhélie, à 147 099 000 km du Soleil.
22/01 : nouvel an chinois.
23/01 : rapprochement Lune (de 2 jours) Vénus Saturne.
1-2/03 (soir) : rapprochement Vénus - Jupiter (0,5°).
20/03 : équinoxe de printemps à 22 h 24.

Lune

Nouvelle Lune : 23/12, 21/01, 20/02.
Pleine Lune : 7/01, 5/02, 7/03.

MESURER SATURNE

Pierre Causeret

Quel est le diamètre de Saturne ? Et de ses anneaux ? Vous pourrez répondre à la question avec cette petite manip simple, nécessitant un instrument, lunette ou télescope, et un oculaire réticulé.

Au début du 17e siècle, Johannes Kepler établissait un plan précis des orbites des six planètes connues du Système solaire. On connaissait alors les distances des planètes au Soleil ainsi que les distances des planètes entre elles à un instant donné, en unités astronomiques[1].
En 1672, Cassini et Richer mesuraient la parallaxe de Mars depuis Cayenne et Berlin et en déduisaient la valeur de l'unité astronomique. Ils ont obtenu environ 130 millions de nos kilomètres actuels[2].
C'était encore peu précis mais les mesures se sont ensuite améliorées avec d'autres mesures de la parallaxe de Mars, avec des observations de passages de Vénus devant le Soleil ou avec la mesure de la parallaxe de l'astéroïde Éros. La mécanique céleste nous permet donc de connaître la distance d'une planète à un instant donné.

Pendant l'école d'été 2022, nous avons observé la planète Saturne le samedi 20 août avec le Dobson de 300 mm du Clea. Stellarium nous indiquait alors sa distance, un peu plus de 8,86 unités astronomiques, soit 1 330 000 000 km. Connaissant sa distance, comment trouver son diamètre ? Il suffit de déterminer son diamètre apparent, c'est-à-dire l'angle sous lequel on observe son diamètre depuis la Terre. Nous aurions pu photographier la planète au foyer du télescope et en déduire son diamètre apparent connaissant la taille d'un pixel et la focale de l'instrument. Nous avons choisi une méthode plus simple, chronométrer le passage de Saturne devant le fil d'un oculaire réticulé (avec réticule éclairé), en utilisant pour cela le mouvement apparent du ciel (figure 1).

Les mesures

Voici les résultats des chronométrages en seconde, par 11 observateurs différents.

1,55	1,3	1,6	1,4	1,1	1,27	1,33	1,1	0,95	1,57	1,35

On fait la moyenne des résultats et on obtient 1,32 s.
Comment passer au diamètre apparent de Saturne ?

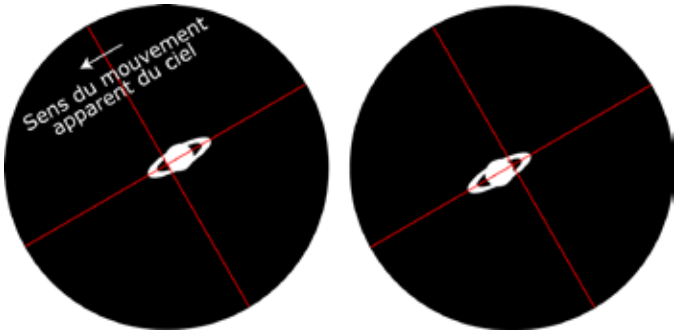


Fig.1. **L'oculaire est tourné pour qu'un des fils du réticule soit parallèle à l'équateur céleste.**
1a. On déclenche le chronomètre quand la planète est tangente au fil perpendiculaire au mouvement apparent.
1b. On arrête le chronomètre quand la planète a traversé le fil.
Dans la pratique, il est plus simple d'avoir une personne pour chronométrer, l'observateur se contentant de crier « top » deux fois.

Calcul du diamètre apparent

Si on suppose que Saturne est proche de l'équateur céleste, la rotation de la Terre induit un mouvement apparent du ciel de 360° en 24 h, donc de 15° par heure, soit 15' par minute ou 15" par seconde. Notre mesure de 1,32 seconde correspond alors à un diamètre apparent pour Saturne de 19,8".
En réalité, Saturne n'étant pas sur l'équateur, il faut introduire un facteur cos δ où δ est la déclinaison (voir encadré page suivante). Avec une déclinaison de -16° pour Saturne ce jour-là, le mouvement apparent n'est plus que de 14,4" par seconde et le diamètre apparent de Saturne devient 19".

Du diamètre apparent au diamètre réel

La planète Saturne, située à une distance r de 1,33 milliard de km nous apparaît sous un angle a de 19". Quel est son diamètre réel d ? C'est un problème habituel en astronomie que l'on peut résoudre avec d = ra si l'angle est en radian, ou avec de la trigonométrie, ou encore avec la proportionnalité entre l'angle au centre et la longueur d'un arc :

360° → 2πr avec r = 1 330 000 000 km
1" → 2πr/(360×3600) soit 6 450 km
19" → 19×2πr/(360×3600) soit 122 500 km

122 500 km au lieu de 120 500 pour le diamètre équatorial, ce n'est pas si mal ! Mesurer un temps au centième de seconde était sûrement ambitieux.

1 L'unité astronomique est, à l'origine, la mesure du demi grand axe de l'orbite terrestre, soit approximativement 150 millions de km. En 2012, sa valeur fut fixée à 149 597 870 700 mètres, le mètre étant défini comme la distance parcourue par la lumière en un temps donné.
2 Voir l'article de Béatrice Sandré sur le sujet dans le n° 137 des Cahiers Clairaut.

Les valeurs minimale et maximale chronométrées donnent respectivement 88 000 et 149 000 km...

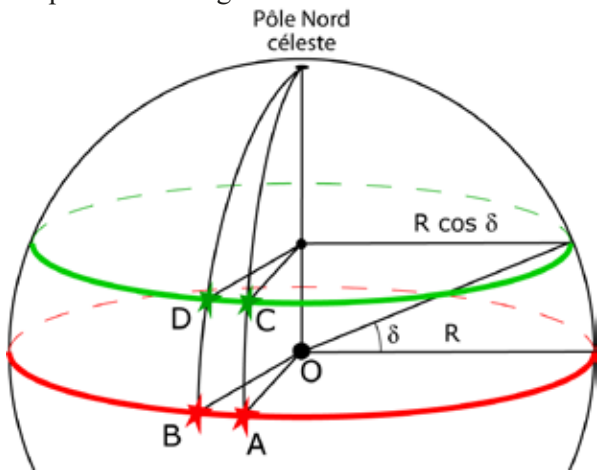
Mouvement apparent et déclinaison

On se place sur la sphère céleste (imaginaire) de rayon R. Une étoile située sur l'équateur céleste (en rouge ici), se déplace de A en B en 1 minute. La longueur de l'arc AB est égale à $2\pi R/1\,440$ (24 h = 1 440 minutes).

Pendant ce même temps, l'étoile verte de déclinaison δ va se déplacer de C en D, l'arc de parallèle CD étant égal à $2\pi R\cos\delta/1\,440$.

Pour un observateur en O, l'étoile verte s'est déplacée d'un angle plus petit que l'étoile rouge, le facteur étant égal à cos δ.

Remarque : pour des temps courts, on assimile l'arc de parallèle CD calculé ici et l'arc de grand cercle CD correspondant à l'angle de sommet O.



La mesure des anneaux

La même mesure a été effectuée pour mesurer le diamètre des anneaux. Par chance, les anneaux apparaissent comme une ellipse dont le grand axe est presque parallèle au sens du déplacement.

Le temps moyen mesuré était de 3,3". Avec la même méthode que précédemment, on en déduit le diamètre apparent des anneaux puis leur diamètre réel. On trouve 307 000 km.

Cela semble beaucoup : dans un télescope d'amateur, on observe les anneaux A et B dont le diamètre maximal est donné à un peu moins de 280 000 km. Les valeurs minimale et maximale chronométrées donnaient respectivement 281 000 et 345 000 km.

Conclusion

Il ne faut pas attendre de cette méthode une grande précision mais elle permet d'obtenir un bon ordre de grandeur pour le diamètre de Saturne et de ses anneaux. Si on veut obtenir de meilleurs résultats, il faudrait filmer le passage de Saturne pour avoir une meilleure précision sur le chronométrage ou mesurer les diamètres apparents avec une autre méthode...

■

CARTES ET LÉGENDES DES 88 CONSTELLATIONS
UNE NOUVELLE PUBLICATION DU CLEA



Il s'agit des fiches revisitées déjà présentes sur le CD du hors-série n° 11. Mais les légendes ont été réécrites et complétées, des objets ont été ajoutés ainsi que des cartes d'ensemble.

Ce recueil a été conçu pour vous aider à animer des soirées astronomie.

Au sommaire :

Correspondance des principaux dieux grecs / dieux latins.
Introduction.
Mode d'emploi des fiches.
Liste des constellations.
Cartes d'ensemble (printemps / été / automne / hiver / pôle Nord / pôle Sud).
Fiches : 88 fiches avec, pour chacune d'elles, la carte de la constellation, la légende associée ou son origine ainsi que les principaux objets à observer.

En vente sur le site du Clea ventes.clea-astro.eu onglet
112 pages, 12 euros (tarif réduit 8 € par 10)

DE LA SPECTROSCOPIE BASSE RÉSOLUTION
À LA DÉTERMINATION DU RAYON D'UNE ÉTOILE DEPUIS LE LYCÉE

Léna C. (TES2), Gaetan S. (1STI2D2), Rémy K. (1STI2D3), Dorian F. (1SEN), Valentin K. (1SEN) et Nicolas L. (2de) avec l'aide de leurs professeurs M. STORTZ Bertrand et M. DEVAUX Jean Sébastien.

Cette activité a été réalisée en 2014 dans le cadre d'un club astronomie au lycée Jean Moulin de Béziers. À l'aide de l'équipement « Astro à l'école » et d'un simple réseau, elle permet de remonter jusqu'au rayon des étoiles…

L'objectif de cet article est de montrer comment le questionnement, l'expérimentation permettent de faire émerger à travers la démarche scientifique des découvertes étonnantes avec nos élèves.
Dans le cadre du club Astronomie du lycée, nous avons invité les élèves à se lancer dans le concours C-génial. Le statut des élèves est passé d'apprenants à découvreurs de notions qui leur paraissaient inaccessibles d'autant que le groupe d'élèves impliqués n'avaient que peu de connaissances en sciences.
Après une rapide présentation du ciel avec la fabrication d'un cherche-étoiles et une présentation du logiciel libre Stellarium, nous nous sommes retrouvés autour du télescope dans la cour du lycée pour observer ce ciel que nous étions en train d'apprivoiser.
Le déclenchement de l'aventure s'est fait autour d'une expérience on ne peut plus classique : la décomposition de la lumière par un prisme.
La question que nous avons donc alors posée a été :

Peut-on étudier la lumière des étoiles ? Ou plutôt qu'est-ce que cela peut nous apporter ?

Pour faire l'étude de la lumière, on utilise depuis longtemps un prisme. Les élèves avaient toujours vu l'expérience réalisée par leur professeur et ce fut leur tour d'expérimenter.
Les éléments nécessaires en poche, un prisme et une lampe blanche, une fente fine, une lentille et un condenseur pour enfin obtenir un spectre ; puis une lampe à vapeur de mercure pour découvrir que la lumière bleutée de l'ampoule était composée de quelques lumières colorées seulement. La lumière était donc plus complexe que prévue.



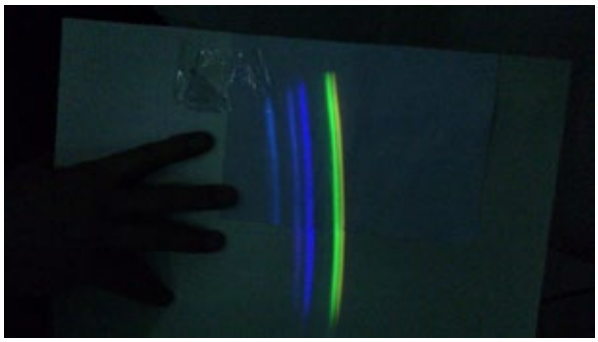


Fig.1. **Expérience en classe de la décomposition de la lumière.**

Afin d'étudier la lumière, les élèves ont fabriqué un spectroscope maison. Avec un CDrom, on peut aussi décomposer la lumière. Mais il nous faut toujours une fente pour que, dans le spectre, les motifs ne se recouvrent pas afin que la décomposition soit exploitable.
Avec un tube en carton suffisamment long, muni d'une fente réalisée avec du scotch opaque et d'un bout de CD placé à l'autre extrémité du tube, nous avons réalisé notre propre spectroscope[1].



Fig.2. **Spectroscope maison et spectre d'un tube fluorescent.**

Différentes sources de lumière sont observées jusqu'à la plus surprenante, le Soleil. Dans le spectre que l'on croyait continu, on voit apparaître des raies sombres.

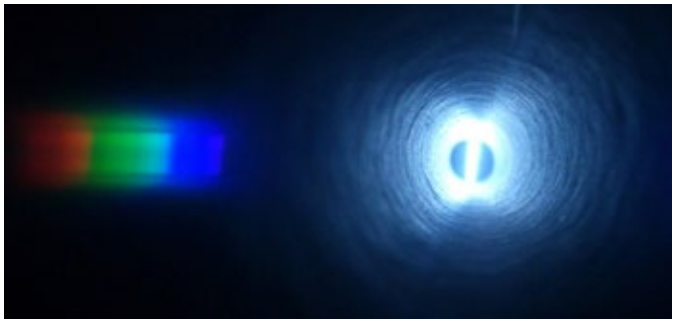


Fig.3. **Spectre du Soleil à travers notre spectroscope.**

1 Il faut auparavant enlever la couche de « peinture » du CD avec du gros ruban adhésif pour le rendre transparent...

Est-ce la même chose pour les autres étoiles ?

Le club est doté d'un Star Analyzer, un réseau de 100 traits au mm optimisé permettant d'obtenir un spectre des étoiles. Voici quelques résultats d'étoiles que nous avons obtenus en faisant un léger filé avec le télescope pour des étoiles particulièrement brillantes.



Fig.4. **Le Star Analyser fixé sur la caméra. Le réseau doit être aligné avec le capteur : en plaçant les traits du réseau parallèles à la largeur du capteur, le spectre se forme suivant la longueur.**

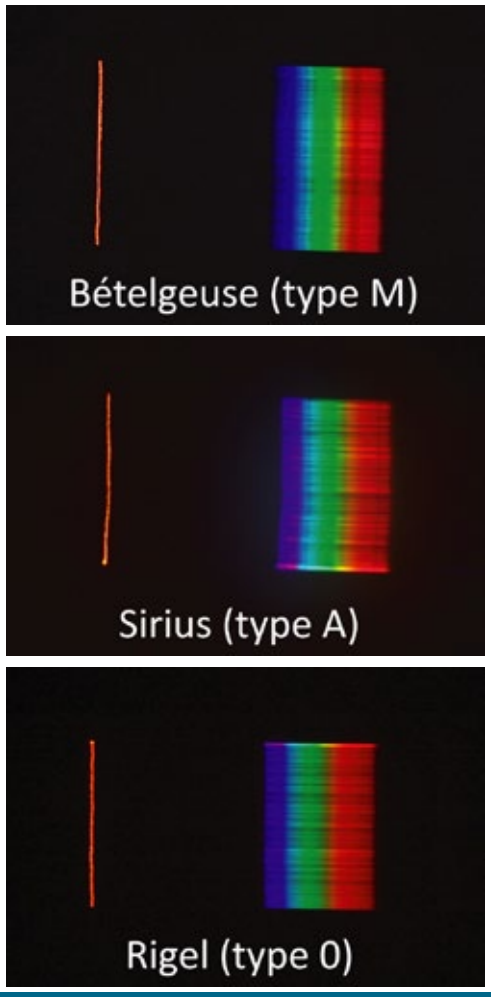


Fig.5. **Spectres de trois étoiles réalisés avec le Star Analyser. Pour que les images soient lisibles, il faut étaler le spectre en utilisant la monture. La caméra est orientée pour que le déplacement en ascension droite soit parallèle à la largeur du capteur. On déclenche et on réalise un filé sans la motorisation. Il n'y a d'ailleurs pas besoin de fente ici puisque les étoiles sont ponctuelles.**

Les élèves découvrent alors que les trois étoiles n'ont pas le même spectre.

Comment sont classées les étoiles ?

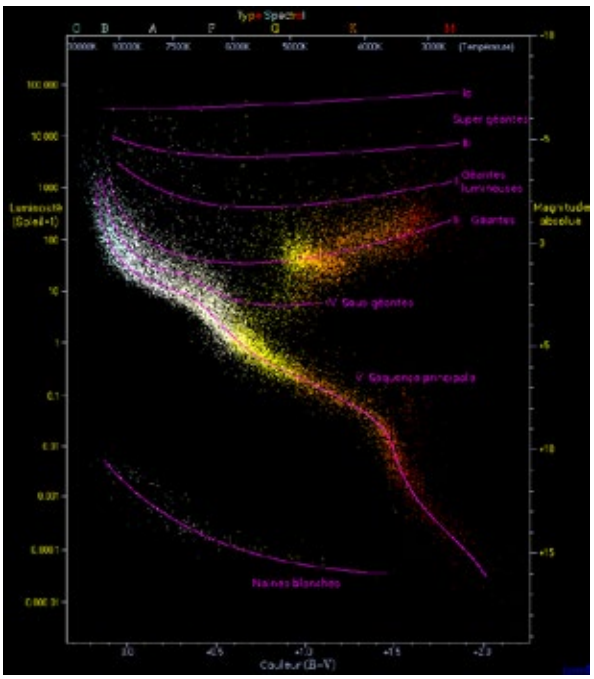


Fig.6. **Diagramme HR (source Wikipédia).**

On peut voir sur ce diagramme que les étoiles sont classées en fonction de 4 paramètres : la luminosité et la magnitude absolue d'une part, la température de surface et le type spectral d'autre part.

Il a fallu que les élèves par binôme se lancent dans la signification de chacun de ces termes. Par une recherche sur Internet, ils ont découvert les relations mathématiques qui relient ces grandeurs, ce qui permettra de se poser la question à l'origine de ce travail.

La luminosité stellaire

En astronomie, elle représente la quantité totale d'énergie rayonnée (dans le domaine électro-magnétique) par unité de temps par un astre. Elle représente donc la brillance intrinsèque de l'astre, et non son éclat apparent qui lui dépend de la distance.
La relation entre température de surface (T), rayon (R) et luminosité (L) d'un astre s'écrit :

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

$4\pi R^2$ représente la surface de l'étoile (de rayon R) ;
T est sa température de surface ;
σ est la constante de Stefan-Boltzmann

$$\sigma = 5{,}670\,373 \cdot 10^{-8}\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$$

La luminosité est donc directement reliée au rayon de l'étoile (puisque la surface dépend de R^2) ainsi qu'à sa température.

La magnitude absolue

La magnitude est une grandeur permettant d'évaluer voire de comparer la luminosité des étoiles.
Elle est définie par la magnitude apparente qu'aurait cet

astre s'il était placé à une distance de référence fixée à 10 parsecs.
1 parsec c'est la distance à laquelle il faut placer un objet dont la taille est 1'unité astronomique (distance Terre-Soleil) pour le voir sous un angle de 1" d'arc (1" = 1/3 600°)
La magnitude s'obtient par la formule suivante :

$$M = -2{,}5 \log L + C$$

où L représente la luminosité d'une étoile, mesurée en « luminosité solaire », unité de mesure de la luminosité : $L_0 = 3{,}826 \cdot 10^{26}$ W
« C » correspond à une constante pouvant prendre différentes valeurs distinctes en fonction des bandes spectrales étudiées.
C = 5,48 = Mb (magnitude bolométrique, dans tout le spectre)
ou C = Mv = 4,83 (magnitude visuelle).

Remarque : la valeur de L_0 peut varier selon le système d'unités utilisé, mais est souvent exprimée en watt.

Le type spectral

On classe les étoiles en fonction de leur spectre, des étoiles les plus chaudes au plus froides : O B A F G K M.
Une question se pose alors :
Comment détermine-t-on la température d'une étoile ?
Rappel sur la loi empirique de Wien

$$\lambda_{max} \cdot T = 2{,}898 \cdot 10^{-3} K \cdot m$$

Grâce à cette loi, on peut déterminer la température de surface d'une étoile si on connaît la longueur d'onde correspondant au maximum de la courbe écrite par le spectre de l'étoile.

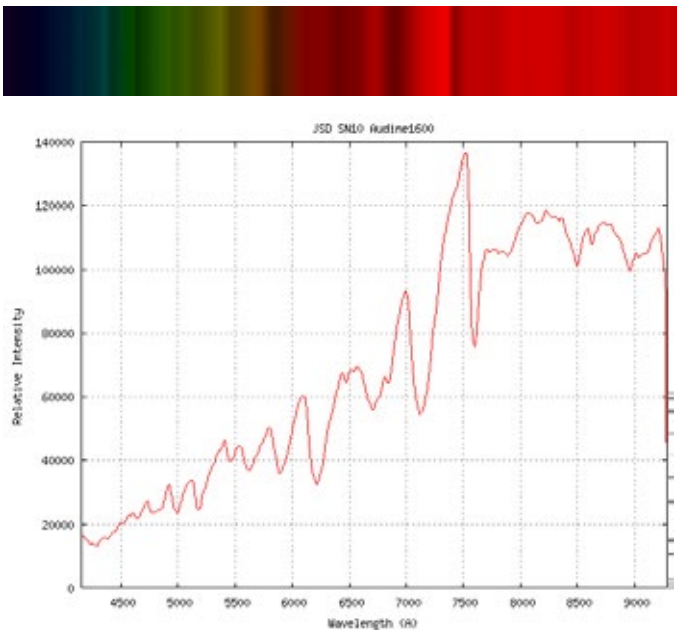


Fig.7. Le spectre de l'étoile μ Gem que nous avons réalisé avec une caméra Audine. Si on essaie de le faire correspondre à une courbe de corps noir, on trouve un λ_{max} autour de 7750 Å.

L'ensemble des relations précédentes montrent le lien qui existe entre les quatre paramètres qui permettent de caractériser les étoiles.

Cependant un nouveau paramètre vient d'apparaître, R le rayon de l'étoile.
La nouvelle tournure est donc la suivante : sommes-nous capables de déterminer le rayon d'une étoile en lisant son spectre à l'aide du Star Analyzer…

Pouvons-nous réellement déterminer le rayon d'une étoile au lycée ?
Afin de vérifier que ce raisonnement est valable, nous l'avons utilisé pour l'étoile la mieux connue : le Soleil.
Pour traiter les étoiles dont nous obtiendrons le spectre il suffit de modifier les différentes formules afin de pouvoir les exploiter.

À l'aide de la magnitude[2] des étoiles que l'on peut trouver dans des catalogues, on peut déterminer la luminosité stellaire L :

$$L = 10^{\frac{C-M}{2,5}}$$

L'étude du spectre permet de trouver l'ordre de grandeur du λ_{max} puis de déterminer ainsi la température de surface de l'étoile à l'aide de la loi de Wien.
On en déduit le rayon de l'étoile finalement à l'aide de la relation :

$$R = \sqrt{\frac{L}{4\pi\sigma T^4}}$$

Ici une vérification de notre fichier avec le Soleil. On retrouve son diamètre à partir d'un λ_{max} de 5 000 Å trouvé dans la littérature.

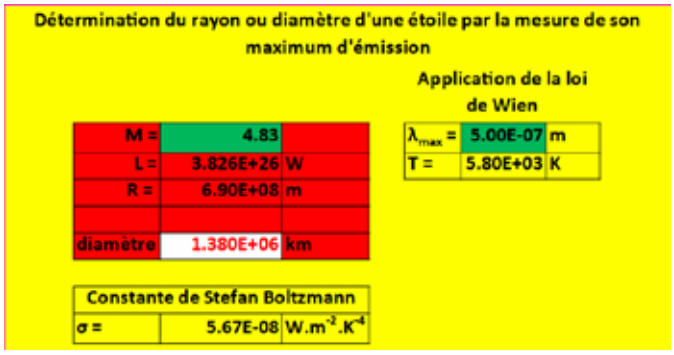


Fig.8. Essai d'application des formules au Soleil. Si on entre la valeur du λ_{max} (5E-7 m), on trouve la température de surface T (5 800 K) avec la loi de Wien. On donne ensuite la magnitude absolue M (4,83) et les formules permettent d'obtenir sa luminosité L puis son rayon R et son diamètre (1 380 000 km).

Si on reprend l'exemple de l'étoile μ Gem, sur les infos que nous avons pu trouver, la taille de cette étoile est de l'ordre de 50 fois la taille de notre Soleil.
À l'aide notre étude, en entrant le λ_{max} et la magnitude absolue M, nous obtenons que la taille de cette étoile est

2 La magnitude absolue M peut être calculée à partir de la magnitude visuelle et de la distance de l'étoile.

de l'ordre de 42 fois celle du Soleil.

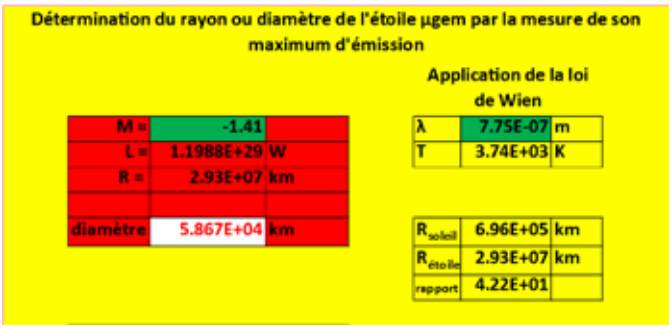


Fig.9. **Calculs sur l'étoile µ Gem.**

Nous avons donc commis une erreur relative de

$$\frac{(50-42)}{50} = 0{,}16$$

soit 16 % . Il est à noter également que nous sommes aussi limités par la précision de notre détermination du λ_{max} avec un Star Analyzer l'incertitude n'est pas négligeable.Pour nous aider dans notre travail, nous avons fait appel à un des développeurs du logiciel d'astronomie AUDELA, M. Mauclair Benjamin. Celui-ci nous a réalisé une routine permettant à partir des clichés et de fichiers cosmétiques de traiter les images afin d'obtenir les spectres étalonnés pour déterminer le λ_{max} et d'obtenir le rayon de quelques étoiles.

Pour étalonner les différents spectres, nous avons tout d'abord réalisé un spectre de Regulus et comparé avec son spectre connu et répertorié, en utilisant deux raies caractéristiques (Hβ à 4 861Å et O2 à 7 605 Å).

À l'époque du dépôt de dossier qui n'a pas été malheureusement retenu par le jury du concours, nous n'avons faute d'une météo conciliante pu faire que les deux mesures présentées ci-dessus.



Fig.10. **Montage de la caméra iNova avec le Star Analyser sur un C8 avec réducteur de focale.**

Voici les mesures sur deux étoiles que nous avons réalisées par la suite.

72 Leo

À l'aide du télescope (un C8 avec réducteur de focale) et d'une caméra iNova sur laquelle on a fixé un Star Analyzer, nous avons obtenu le spectre de l'étoile 72 Leo.

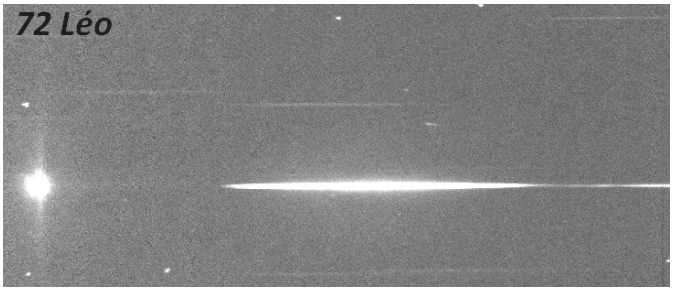


Fig.11. **Le spectre obtenu de 72 Leo.**

L'information contenue dans cette partie de l'image est ensuite traitée via le logiciel Audela afin d'obtenir le profil du spectre, et sa transcription colorée.

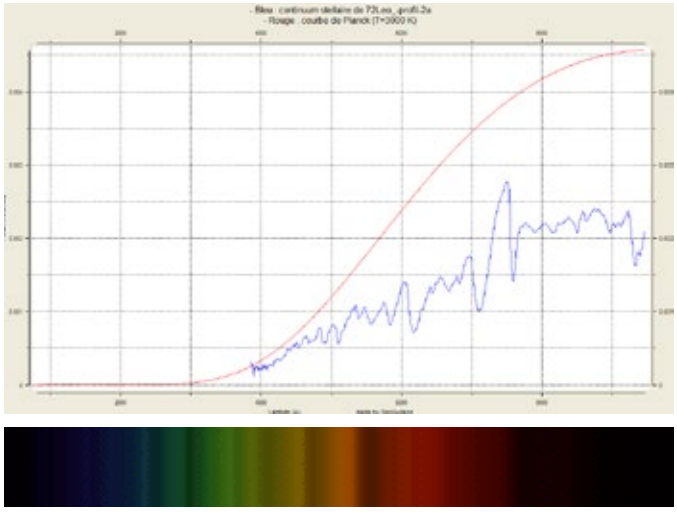


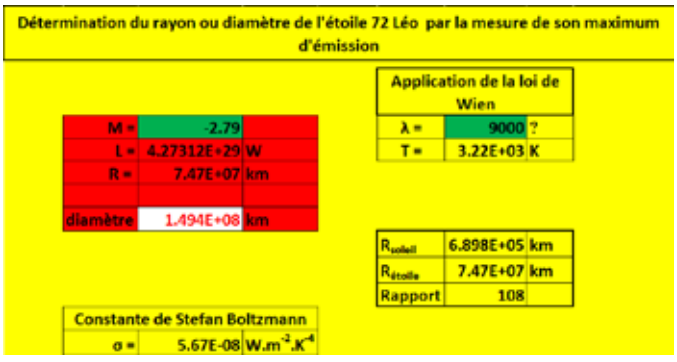
Fig.12. **Le spectre de 72 Leo sous forme de courbe (en bleu) puis colorisé afin d'être plus facile à identifier. Au-dessus du profil du spectre, la courbe de Planck en rouge, courbe correspondant à un corps noir, modélisée par SpcAudace.**

À partir du profil, on peut déterminer un encadrement de la valeur du λ_{max} en regardant la partie montante du profil et sa partie descendante et en essayant de faire correspondre une courbe de corps noir :

$$9\,000 \text{ Å} < \lambda_{max} < 10\,000 \text{ Å}$$

La magnitude absolue de cette étoile est obtenue avec le logiciel Stellarium

$$M = -2{,}79$$



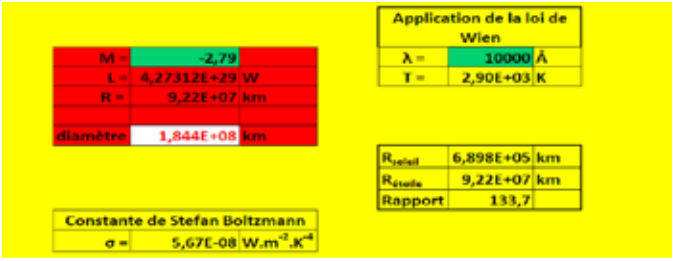


Fig.13. La feuille de calcul pour 72 Leo avec un λ_{max} à 9 000 puis à 10 000 Å.

Toujours avec la même feuille de calcul préparée à cet effet, on en déduit un encadrement du rayon de l'étoile :

On peut voir ici que cette étoile située à 959 al de la Terre (distance donnée par Stellarium) est mesurable, elle possède un rayon compris entre **108 et 134 fois** celui de notre Soleil.

60 Leo

Toujours à l'aide du télescope et d'une caméra iNova sur laquelle on a fixé un Star Analyzer, nous avons obtenu le spectre de l'étoile 60 Leo.

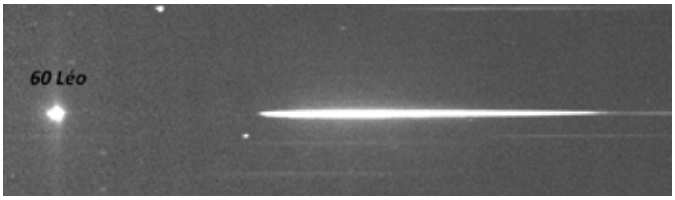


Fig.14. Le spectre obtenu de 60 Leo.

L'information contenue dans cette partie de l'image est ensuite traitée via le logiciel Audela afin d'obtenir le profil du spectre, et sa transcription colorée :

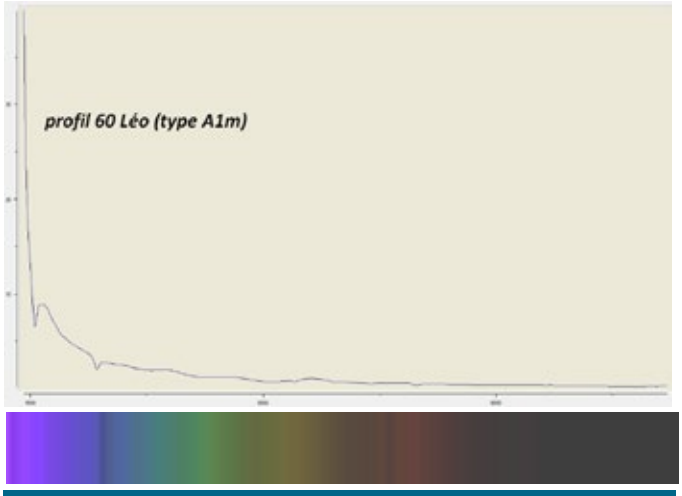


Fig.15. Le spectre de 60 Leo sous forme de courbe puis colorisé.

À partir du profil, on peut déterminer une valeur maximale du λ_{max} :

$$4000 \text{ Å} > \lambda_{max}$$

La magnitude absolue de cette étoile est obtenue avec le logiciel Stellarium

$$M = 1{,}45$$

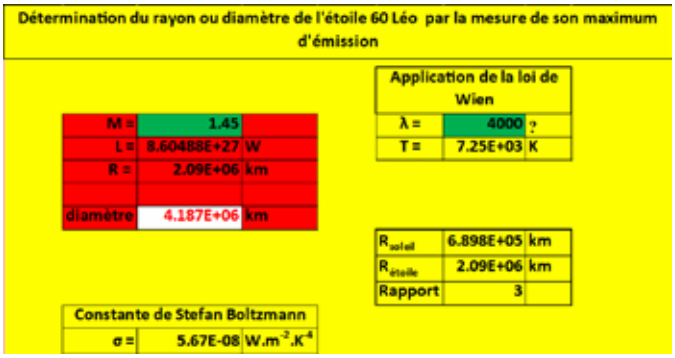


Fig.16. La feuille de calcul avec un λ_{max} à 4 000 Å.

On peut voir ici que cette étoile située à 127 al de la Terre (distance donnée par Stellarium) possède un rayon maximal de 3 fois celui de notre Soleil. Il s'agit bien d'une valeur maximale : si λ_{max} est inférieur à 4 000 Å, T est supérieur à 7 250 K et R est inférieur à 2,09 Mkm.

Conclusion

Même si la participation au concours n'a pas eu le succès escompté, les élèves ont pu mettre en œuvre une démarche expérimentale à son terme. Les résultats obtenus semblent montrer que nous ne sommes pas trop loin de la réalité. Le projet aurait pu être plus complet si nous avions eu la possibilité de réaliser davantage de mesures.

Il semblerait toutefois que la réponse à la question finale de notre projet soit :

On peut s'approcher de la détermination du rayon des étoiles dans la cour du lycée.

■

Solutions des mots croisés page 28

Horizontalement

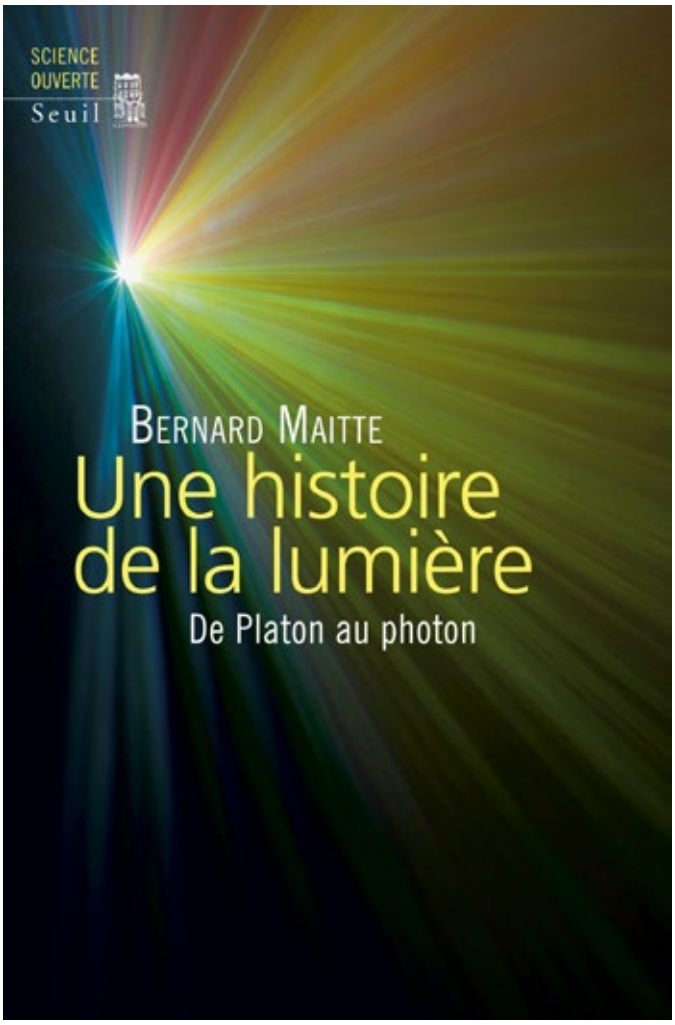
1. Hydrogène. **2.** Canut. **3.** Lunette. **4.** ISS. Aérai. **5.** Ion. GPL ; **6.** Sot. Toise. **7.** Pied. Dei. **8.** He (hélium). Âge. Dt. **9.** ESA. Aster. **10.** Riz. **11.** Expo. Dieu.

Verticalement

1. Héliosphère. **2.** US. Oies. **3.** Densité. Arp. **4.** da (déciare) ou DA (218 en hexadécimal). Io. **5.** Octant (on y trouve le pôle Sud céleste). Gaz. **6.** Gâté. Odes. **7.** Énergie. Tri. **8.** Nu. Apside. **9.** Étoile. Trou.

UNE HISTOIRE DE LA LUMIÈRE

Auteur : **Bernard Maitte**
Date de publication : 2015
Éditeur : Le Seuil, : ISBN 978.2.02.123705.4



Bernard Maitte est professeur émérite d'Histoire des sciences et d'épistémologie à l'université de Lille-1 Sciences et technologies.
Bernard Maitte est aussi l'auteur du livre *Histoire de l'arc-en-ciel*.

Le sous-titre du livre est : « de Platon au photon ». Une très riche bibliographie est présente à la fin du livre.
En 400 pages, et en huit parties, l'ouvrage présente une histoire des conceptions et des représentations de la lumière, de l'Antiquité classique (Grèce, Rome) au XXe siècle. Cette histoire est intimement liée aux conditions d'élaboration, de circulation et de transmission des connaissances autour de la Méditerranée, jusqu'à la Renaissance (chapitre I). Elle reste ensuite, et jusqu'au XIXe siècle, principalement l'apanage de l'Europe, avant que l'époque moderne ne permette la diffusion planétaire des connaissances scientifiques.

À la fin du livre, une très intéressante « *chronologie* » permet, sur 25 siècles, de placer les principaux « *jalons scientifiques* » et la « *vie des auteurs cités* » en regard des « *événements historiques et culturels* ».

D'abord intimement liée à la vision, la lumière a commencé à être considérée comme un phénomène indépendant de nos perceptions à partir du Xe siècle, grâce à des savants arabes comme Ibn al-Haytham. Le développement des pratiques que nous associons actuellement à la méthode scientifique, en particulier avec Roger Bacon, ont conduit, au Moyen Âge puis à la Renaissance, au paradigme de l'optique géométrique, avec les concepts de rayon lumineux et de vitesse de la lumière. Le chapitre II du livre présente la « *Naissance de la science moderne* », et développe les contributions de Nicolas Copernic, de Galileo Galilei et de René Descartes.

L'auteur présente dans deux chapitres (les III et IV) le « *triomphe de la mécanique* », expression surprenante pour évoquer la lumière. Le premier concerne « *la géométrisation d'une lumière ondulatoire par Huygens* », et le second est consacré à « *Newton et sa conception 'corpusculaire' de la lumière* ». Ces conceptions font appel à des hypothèses sur les propriétés de la matière. L'optique ondulatoire suppose l'existence d'un « *éther luminifère* », milieu hypothétique permettant la propagation de l'onde lumineuse, et milieu aux propriétés contradictoires.

Les expériences d'Isaac Newton menées de 1666 à 1672 avec un prisme placé sur le trajet d'un pinceau de lumière blanche ont fait entrer le concept de couleur dans le champ de la philosophie naturelle. Les réflexions sur la couleur, approfondies par Nicolas de Malebranche au XVIIe siècle et par Léonhard Euler au « *siècle des Lumières* » (titre du chapitre V), ont été poursuivies au siècle suivant (Hermann von Helmholtz et James Maxwell). La découverte des diverses sortes de cellules réceptrices de la rétine a finalement permis de montrer que la couleur est une perception subjective (modèle trichromatique de la vision diurne, daltonisme).

Au milieu du XVIIe siècle, la propagation rectiligne de la lumière est mise en défaut par la découverte et l'étude expérimentale du phénomène de la diffraction par Francesco Grimaldi. Au début du XIXe siècle, les expériences cruciales de Thomas Young (1802) sur la diffraction de la lumière et les interférences lumineuses,

et le mémoire d'Augustin Fresnel (1818), développement mathématique du « *principe de Huygens* » expliquant les expériences de Young, installent l'optique ondulatoire comme paradigme jusqu'à la fin du siècle.

Le modèle électromagnétique de la lumière développé par James Maxwell (chapitre VII) a conforté le consensus autour de la lumière comme onde. Et l'extension du spectre électromagnétique vers les grandes longueurs d'onde ne rencontre pas de difficultés théoriques (Heinrich Hertz). Par contre, la question de la « *catastrophe ultraviolette* » conduit au développement du modèle du rayonnement thermique du « *corps noir* », et à l'hypothèse des quanta de Max Planck. Ainsi apparaît la constante universelle dite « *constante de Planck* ». L'interprétation de l'effet photoélectrique par Albert Einstein, en 1905, conduit à l'introduction du quantum de lumière, le photon.

Les difficultés d'interprétation des expériences de Michelson et Morley sur la mesure de la vitesse de la lumière conduisent, en 1905 encore, Albert Einstein à proposer l'abandon de l'hypothèse de l'éther. La vitesse de la lumière dans le vide est hissée au statut de constante universelle, indépendante de l'observateur. La théorie de la relativité restreinte rassemble la mécanique et l'optique dans un modèle unifié de la physique (chapitre VIII).
Au cours de la première moitié du XXe siècle, la tentative de conciliation des deux conceptions (corpusculaire et ondulatoire) au sein de la physique quantique se fait avec l'avènement d'un modèle probabiliste (Max Born et Werner Heisenberg), déclenchant une profonde crise d'ordre épistémologique (Congrès Solvay de 1927).

Le livre s'attarde, avec soin et avec une profusion de schémas, sur les phénomènes difficiles à interpréter (la biréfringence de la calcite – Érasme Bartholin, la polarisation de la lumière – Étienne Malus et Augustin Fresnel), et sur les remises en cause des paradigmes (chapitre VI « *Crise et mutation de l'optique* »). L'auteur approfondit méthodiquement le questionnement sur l'élaboration des connaissances. Ce questionnement devrait logiquement faire partie de la formation initiale de tous les enseignants en sciences.
Et ceci implique aussi l'étude indispensable, et passionnante, de l'histoire des sciences.

Daniel Descout
■

DEUX DATES À RÉSERVER DANS VOS AGENDAS 2023

L'**assemblée générale du Clea** aura lieu **dimanche 12 mars** à Dijon au Centre de rencontres internationales. Vous recevrez toutes les informations d'ici là.



Palais des Ducs de Bourgogne place de la Libération (Photo François de Dijon/wikimedia).

L'école d'été du Clea est prévue au Col Bayard **du 17 au 24 août**. Les réservations seront prises à partir de l'équinoxe de printemps.

FORMATIONS EN ASTRONOMIE DANS L'ACADÉMIE DE NICE

Ghislain Bernard, lycée Jean Moulin Draguignan ghislain.bernard@ac-nice.fr

Depuis les années 2000 les formations en astronomie proposées au PAF se sont maintenues dans l'académie de Nice. Elles sont nées avec Francis Berthomieu qui m'a donné le virus de l'astronomie. Ensuite Pierre Le Fur a pris le relai durant de nombreuses années. Petit à petit ces formations se sont installées chaque année ou presque dans le PAF.

Ces dernières années, la formation en astronomie est proposée au PAF une année sur deux aux enseignants de collège et lycée de l'académie, c'est à dire les deux départements du Var et des Alpes-Maritimes.

Nous fonctionnons maintenant à deux formateurs avec Philippe Grussenmeyer qui propose des activités plus spécialement pour le collège.

Deux sessions de 2 jours sont organisées

La première à l'observatoire de Nice. Nous sommes reçus par l'observatoire de la Côte d'Azur et en particulier par Olga Suarez qui est responsable du, très actif, service éducatif de l'OCA.

La deuxième à l'observatoire amateur du Pic des fées à Hyères. C'est un terrain qui appartient à l'armée et qui est loué à une association pour faire de l'astronomie depuis



de nombreuses années. C'est un partenaire précieux.

De plus, Monsieur l'IPR de sciences physiques M. Rochefeuille a souhaité pour cette année scolaire offrir une formation en astronomie aux jeunes titulaires de physique chimie 3e année (T3). Ils ont pu bénéficier d'une journée au Pic des fées à l'automne et une journée à l'OCA à Nice au printemps. Le but pour ces jeunes titulaires était double. Tout d'abord leur présenter deux lieux avec des structures culturelles liées à l'astronomie (l'observatoire du Pic des fées à Hyères et l'observatoire de la Côte d'Azur à Nice). Ensuite nous leur avons donné quelques idées d'activités pour les élèves.

Nous avons fait le maximum pour que ces 6 journées soient remplies au maximum. Peut-être trop…

Les contenus ont été adaptés aux deux lieux et surtout au format des journées. Les stagiaires ont pu revoir les bases de la cosmographie et découvrir ou revoir des activités réalisables en classes.

De nombreuses activités sont extraites des Cahiers Clairaut et la fabrication de maquettes a permis une meilleure compréhension des phénomènes étudiés.

.

Pour débuter nous avons travaillé sur les bases de cosmographie dans un référentiel terrestre.

- Activité sur la trajectoire du Soleil avec une maquette en carton et un gnomon en extérieur.
- Tracé de méridienne.
- Carte du ciel en Bristol et projection stéréographique.
- Cadran solaire et exploitation de la méridienne (détermination de latitude et longitude d'un lieu).
- Nous avons souhaité aussi insister sur l'instrumentation et nous avons présenté les différents instruments d'observation amateur (télescopes, lunettes, montures etc...).

Pour le collège

- Un atelier sur les distances dans le Système solaire.
- Une présentation du logiciel Stellarium et mise en activité.
- Les phases de la Lune.
- Activité « Constellations en 3D ».
- Position écliptique des planètes. Le zodiaque en 2D et en 3D.

Pour le lycée

- Fabrication d'un Lunoscope pour expliquer l'éclipse de Lune du 16 mai 2022.
- Mesure du diamètre apparent du Soleil avec un sténopé et GeoGebra.
- Méthode d'Aristarque à partir des mesures faites avec GeoGebra.
- Rotation des taches solaires avec GeoGebra.
- Des activités de manipulations de données numériques de l'IMCCE.
- Atelier Regressi IMCCE et trajectoire d'une comète ;
- Rétrogradation de Mars avec l'IMCCE et Regressi puis GeoGebra.



En journée, l'observation de protubérances et taches solaires a été possible grâce à des instruments adaptés.
Pour la bibliothèque nous avions apporté nos livres d'astronomie et des Cahiers Clairaut.
Chaque stagiaire a pu repartir avec un exemplaire de découverte des Cahiers Clairaut.

Pendant ces journées les visites des deux sites ont montré aux stagiaires les ressources culturelles : visite d'Universarium (musée sur l'histoire de l'astronomie à Nice), visite des coupoles de l'observatoire de Hyères et présentation du dispositif Educosmos (suivi photométrique du transit d'exoplanètes) par Olga Suarez.

Enfin pour terminer les stages de 2 jours nous avons organisé une soirée d'observation avec deux télescopes Dobson.

Nous souhaitons la poursuite de ces stages de formation. ■

