



# Astronomie *Québec*

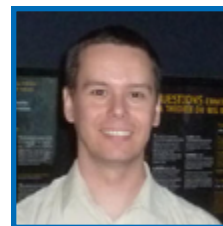
L'Univers et  
ses mystères

Juin / Juillet 2015

Vol. 4 · N° 1

# Éditorial

avec Pierre Paquette



Crédit photo : Al Nagler

## Avant même Galilée

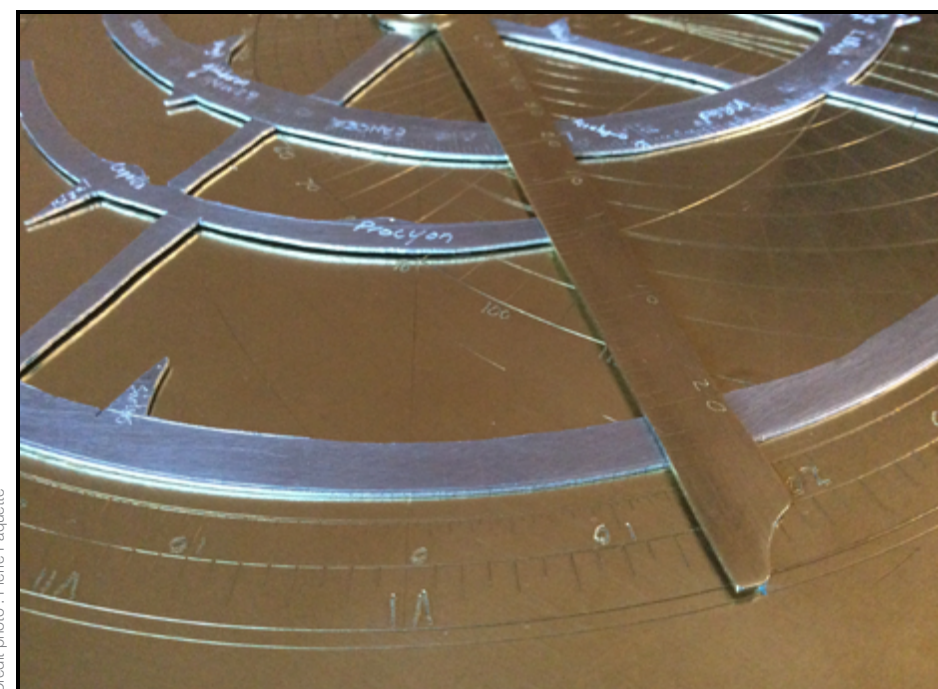
Après une pause à la fin de l'hiver, *Astronomie-Québec* est de retour à sa fréquence habituelle, c'est-à-dire aux deux mois, mais avec un décalage. Ainsi, les éditions annuelles seront dorénavant juin/juillet, août/septembre, octobre/novembre, décembre/janvier, février/mars, et avril/mai.

Une des raisons de cette pause et du décalage est que je me suis découvert une nouvelle passion, en lien avec l'astronomie : les

instruments anciens. Je ne parle pas ici des lunettes et télescopes qui ont été fabriqués avant que mon grand-père ne naisse, mais plutôt de ce que les astronomes utilisaient avant même Galilée. J'ai présenté le résultat partiel de mes recherches lors d'une récente réunion du Club des Astronomes Amateurs de Laval, j'en parlerai prochainement à la Royal Astronomical Society of Canada – Montréal Centre, et je serai heureux d'aller en parler à tout autre club d'astronomie intéressé au Québec.

J'ai d'ailleurs fabriqué quelques modèles d'instruments, et l'assistance a pu ou pourra manipuler un merkhét égyptien (~ 600 AEC), un astrolabe linéaire d'Al Tusi (v. 1200), un cadran de longitude de Regiomontanus (1474), un nocturne (v. 1530), une volvelle jovienne d'Apianus (1540), un quadrant de Gunter (1623), ou encore un astrolabe (v. 200 EC?). J'ai réalisé ces modèles en papier, en bois, en acier, en aluminium, et en laiton.

Au plaisir de vous les présenter en personne !



Crédit photo : Pierre Paquette

Éditeur · Pierre Paquette

Muse · Erin Pecknold

Chroniqueurs · Gilles Boutin · Luc Descoteaux · Geneviève Dufresne · Robert Giguère · Seh Kee Horng · Stéphane Lemon · Pouria Nazemi · Normand Rivard · Gilbert St-Onge · Eddy Szczerbinski · Pierre Tournay

Collaborateurs · Cassandra Bolduc · Michele Ferrara · Donn Starkey · Doug Turnbull

Contact · info@astronomie.quebec

Astronomie-Québec (ISSN 1929-4301) est publié bimestriellement au format PDF et disponible gratuitement au <http://astronomie.quebec>

 /AstronomieQuebec

 @AstronomieQcMag

Un magazine nommé *Astronomie-Québec* fut publié de 1991 à 2001 par Les Éditions astronomiques. Le présent magazine a été fondé en juin 2012 par Pierre Paquette, avec l'aimable autorisation des anciens directeurs des Éditions astronomiques pour utiliser le nom.

Les opinions publiées dans *Astronomie-Québec* n'engagent que leurs auteurs et ne sont pas nécessairement celles de l'éditeur ou celles des annonceurs.

Le contenu d'*Astronomie-Québec* ne peut pas être reproduit (© 2015), mais la publication peut être redistribuée librement ; prière de donner le lien du site Web (<http://astronomie.quebec>) afin de nous permettre de mieux servir nos lecteurs.

Dépôt légal · Bibliothèque et Archives nationales du Québec <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2110203>

## La Voie lactée par Yves Tremblay

Voir l'article de Gilbert St-Onge et Geneviève Dufresne en page 30.

# Voir double : Zêta Coronae Borealis



Toile peinte par Leona Wood. Source: leonawood.com

**Zêta** Coronae Borealis ( $\zeta$  CrB) est une belle étoile double aux composantes de magnitudes individuelles presque égales, à 5,0 et 5,9. En combiné, la magnitude s'établit à 4,6. De telles magnitudes placent cette étoile double à la limite de la perception à l'œil nu sous la pollution lumineuse de la ville, mais nos instruments, même modestes, nous les révèlent facilement. Les couleurs sont partout décrites, parmi les références que j'utilise, comme « verdâtre et bleuâtre », à l'exception de l'*Observer's Handbook* qui les dit jaune et bleue (« Y » et « B »). Les rares images disponibles sur l'internet me portent à prédire que vous les verrez aussi teintées faiblement bleues ou vertes.

L'écart serré de 6,3" se résout facilement dû à la proximité des magnitudes : l'éclat de l'une ne nuit pas à la visibilité de l'autre, et la séparation demeure visible même au moyen d'un grossissement modeste de 40× (selon Sissy Haas). Je suggère cependant 100×, pour le confort.

Pour trouver Zêta, on localise d'abord Arcturus, qui se trouve au-dessus de l'horizon ESE au printemps ; c'est l'étoile jaune la plus brillante des environs. On suit ensuite un chapelet de trois étoiles vers le nord-est :  $\epsilon$  (Epsilon),  $\delta$  (Delta), et enfin Zêta (voir la carte).

Nous pouvons également repérer Zêta à 10° au nord d'Alphecca, l'étoile la plus brillante de la Couronne Boréale, ou bien à 12° à l'ouest de Messier 13, le célèbre amas globulaire d'Hercule.

avec **Luc Descoteaux**



Les deux composantes de Zêta Coronae Borealis sont situées à 470 années-lumière de nous.

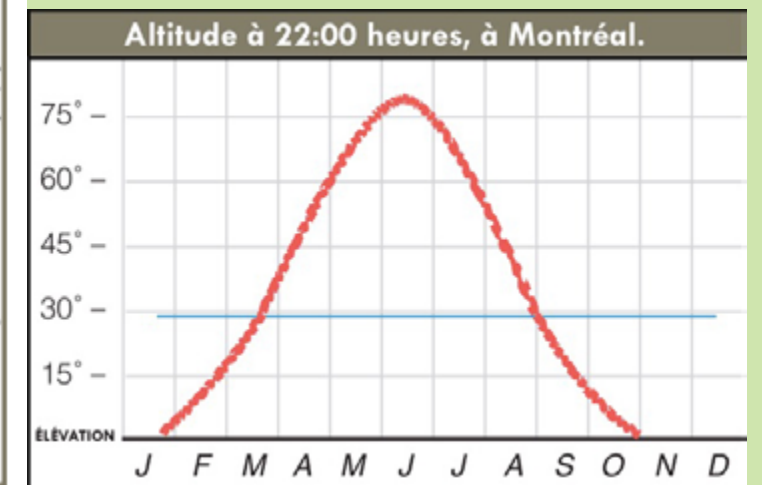
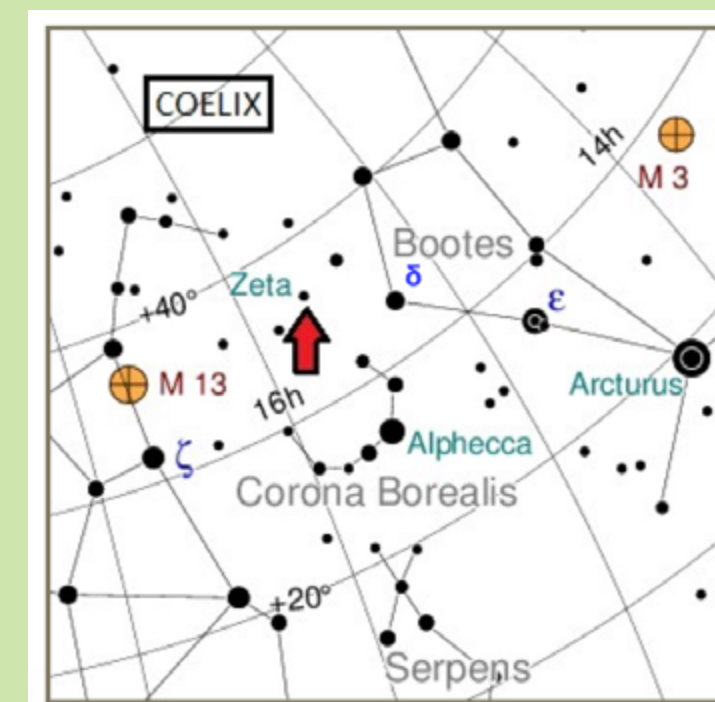
À 6,3" de séparation angulaire, la distance séparant les deux composantes serait d'environ 914 au (unités astronomiques ; 1 au = 149 597 870,7 km ; c'est environ la distance Terre-Soleil). La période orbitale est donc très longue, et on qualifie Zêta de binaire « lente », sans autre précision.

Les deux composantes se nomment  $\zeta^1$  CrB et  $\zeta^2$  CrB ; fait à noter, c'est  $\zeta^2$  CrB qui est la primaire ! De plus,  $\zeta^2$  CrB a été déclaré système triple par les astronomes en 1997, selon des observations spectroscopiques : il y a une binaire de deux étoiles de type B7, chacune orbitant autour de l'autre en 1,7 jours, et une compagne plus éloignée qui orbite ce couple en 251 jours.

Bonnes observations !

## Références

- CHAPMAN, David M.F., éd. *Observer's Handbook 2015*. Toronto, The Royal Astronomical Society of Canada, 2014, 352 p. (ici p. 297).
- HAAS, Sissy. *Double Stars for Small Telescopes*. Cambridge, Sky Publishing, 2007, 184 p. (ici p. 61).
- SINNOTT, Roger W. *Pocket Sky Atlas*. Cambridge, Sky Publishing, 2006, 100 p. (ici p. 53).
- VALLIÈRES, Jean. *Étoiles doubles, multiples et spéciales*. <http://www.ngc7000.com/fr/astrojv/doubles.htm>
- VALLIÈRES, Jean. *Coelix* (logiciel).
- Skyhound, *SkyTools 3* (logiciel).
- Southern Stars. *SkySafari Pro 4* (logiciel).



**Nomenclature :**  
 $\zeta$  CrB · 7 CrB · ADS 9737 · SAO 64834

**Ascension droite (2015,5) :**  
15 h 39 min 58,76 s

**Déclinaison (2015,5) :**  
+36° 35' 27,1"

**Heure du transit\* :**

23 h 53 min  
(Au 1<sup>er</sup> juin)  
22 h 59 min  
(Au 15 juin)  
21 h 59 min  
(Au 30 juin)

\* L'heure d'un transit avance d'environ 4 minutes (235,9 secondes) par jour.

**Altitude au transit :**  
81° (Montréal)

**Magnitudes :**  
A : 5,0  
B : 5,9

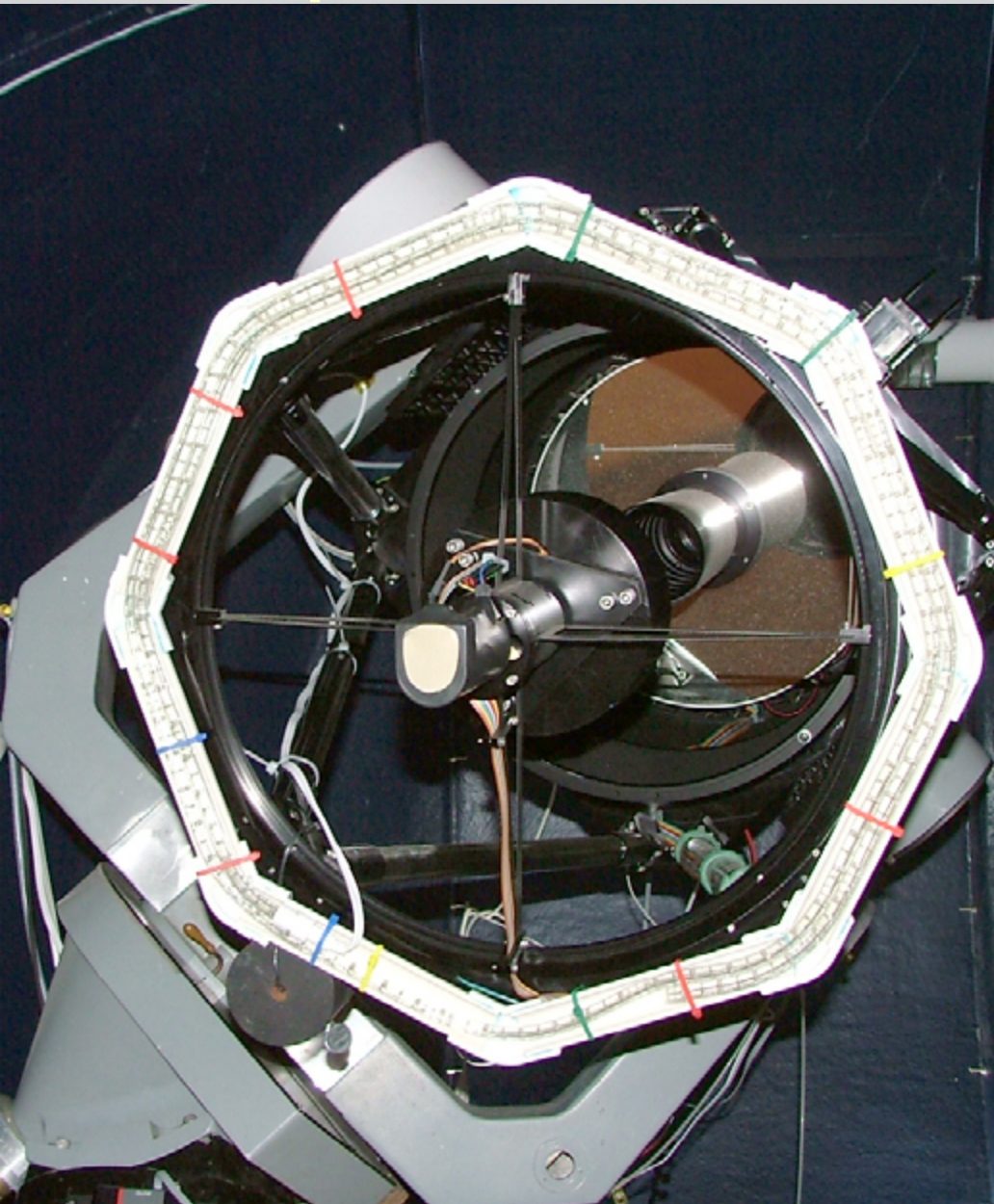
**Séparation / Angle<sup>1</sup> :**  
6,3" / 306°

<sup>1</sup> Mesuré en tournant vers l'est, depuis le nord de la primaire, jusqu'à la secondaire.

**Couleurs :**  
A : Jaune / B : Bleue

**Beauté :**  
!!! (*Observer's Handbook*)

# Repousser les limites : *Flat field* avec caméra CCD

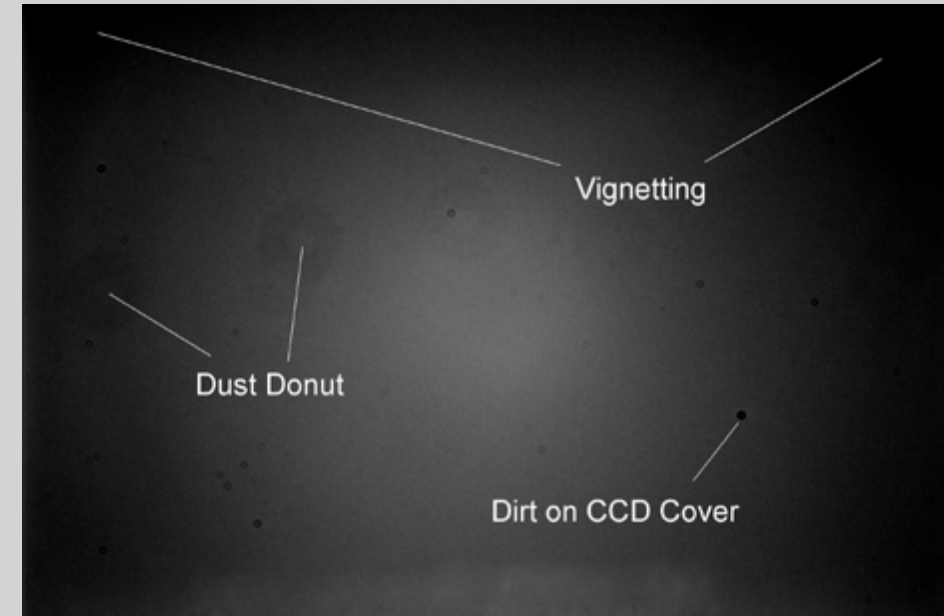


Toutes les images sont de l'auteur.

**Regardez** dans la boîte d'accessoires de l'astronome amateur typique, et vous trouverez probablement une caméra à dispositif à transfert de charge (DTC; mieux connu sous l'acronyme anglais CCD, de *charge-coupled device*). Il y a environ une trentaine d'années, ces dispositifs ont révolutionné les marchés des télécommunications et de la photographie; depuis un peu plus d'une dizaine, ils sont aussi omniprésents dans le domaine de l'astronomie amateur. Les astronomes professionnels les utilisent depuis les années 1970. Le CCD a rapidement remplacé le film photographique dans de nombreuses applications d'imagerie astronomique<sup>[1]</sup>. Avec cette nouvelle technologie vient la demande d'obtenir le plus de précision que ce que l'instrument peut fournir.

En raison de l'extrême versatilité et de la sensibilité du CCD, de nombreux problèmes difficiles liés à l'astrophotographie argentique peuvent maintenant être adressés plus facilement. Des problèmes tels que les grains de poussière, les taches sur les surfaces optiques ou le vignettage étaient communs en astrophotographie argentique, mais peuvent désormais être facilement enlevés en utilisant l'imagerie CCD. Le vignettage est un ombrage symétrique autour du périmètre d'une image, provoqué par des courbures ou des obstructions optiques spécifiques dans la chaîne optique. Tous ces problèmes provoquent un éclairage non uniforme de la surface optique du capteur CCD. Dans l'image CCD, ces problèmes sont vus comme

**Collaboration spéciale de Donn Starkey**



des « beignets » de poussière, des taches sombres ou une vignette sombre sur le pourtour de l'image (voir image ci-dessus). Ces problèmes constituent un défi pour les astronomes professionnels aussi bien qu'amateurs. Heureusement, le CCD offre aussi une solution à ces problèmes. Cette solution est l'image de champ plat (ci-après désignée *Flat Field* selon le terme anglais, plus répandu). L'image *flat field*, communément appelée simplement un *flat*, est essentiellement une image des problèmes contenus dans le système optique du télescope.

La caméra CCD permet à l'astronome de prendre une photo des problèmes, puis de les soustraire électroniquement de l'image originale. Toutes les modifications apportées au train optique du télescope, comme la rotation de la caméra ou le changement du filtre, demande la prise d'un nouveau *flat*.

Cela semble assez simple. En théorie, ce l'est. Toutefois, comme cela est

souvent le cas et comme disent les anglophones, « le diable est dans les détails ». Dans ce cas, le problème est d'obtenir un *éclairage uniforme* dans le télescope de sorte que la source d'éclairage elle-même ne provoque pas encore plus d'irrégularités dans l'image. L'éclairage du *flat field* est une source de frustration et de questionnement pour de nombreux astronomes. Essentiellement, une source d'éclairage de *flat field* ne doit contenir aucune variation d'intensité d'un côté à l'autre. Tous les « points chauds » de la source se traduiront par des zones claires dans le *flat field*, et élimineront la raison d'être même de l'image *flat field*. La source de lumière du système d'éclairage doit contenir toutes les longueurs d'onde que verra la CCD pour la mission scientifique particulière; par exemple, une source qui n'émet aucune lumière bleue ne sera pas efficace pour faire des *flat fields* à travers un filtre bleu. La source d'éclairage doit être *facilement disponible* pendant toute la session d'imagerie puisque,

comme mentionné précédemment, tout changement dans le train optique du télescope va modifier l'optique et nécessiter de prendre une autre série de *flat fields*. Enfin, la source d'éclairage doit être *assez brillante à tous les longueurs d'onde* pour que les *flats* puissent être pris rapidement. Une source d'éclairage qui produit si peu de lumière bleue qu'il lui faut 30 minutes pour faire un *flat field* à travers un filtre bleu n'est pas une bonne utilisation du temps de télescope !

## Les bases

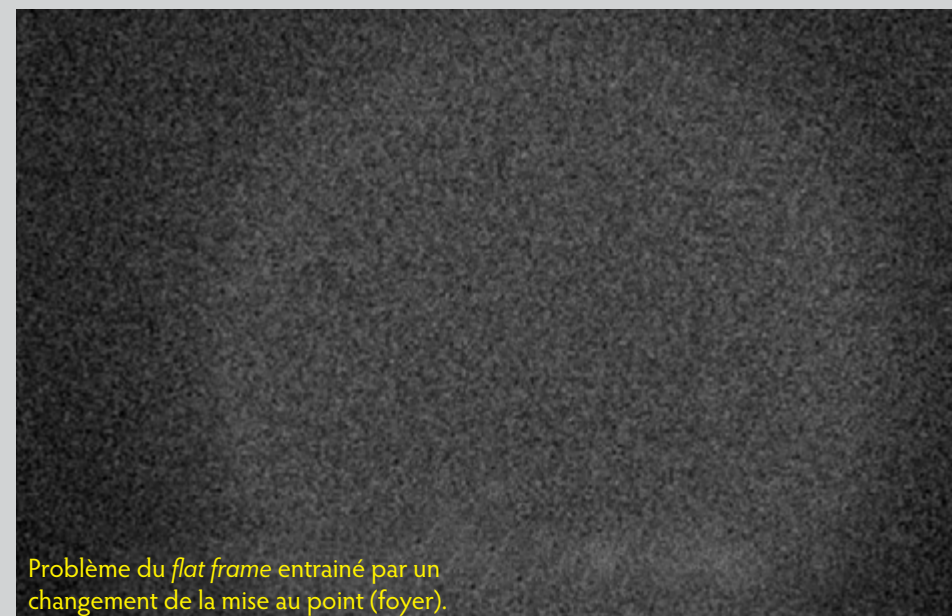
Il existe deux techniques de base pour faire des *flat fields* : les *flats* du ciel et les *flats* du dôme. Les *flats* du ciel utilisent le ciel du soir juste après le coucher du soleil ou le ciel du matin juste avant le lever du soleil comme source de lumière pour produire les *flats*. Les *flats* du dôme utilisent une source artificielle de lumière éclairant un réflecteur à l'intérieur du dôme de l'observatoire pour produire un champ éclairé de façon uniforme. Le réflecteur est imagé à travers le télescope par le CCD pour produire l'image *flat field*. Il est évident que un avantage important de la méthode du ciel est qu'aucun matériel supplémentaire n'a à être acheté ou fabriqué.

Une variante du *flat* du ciel est la méthode du balayage à la dérive (*drift scanning* en anglais). Ici, le moteur d'ascension droite de la monture du télescope est éteint, et on laisse le ciel dériver devant l'ouverture de l'appareil. Une variante la méthode du balayage à la dérive est la méthode de l'intégration à délai temporel (*time*

delay integration ou TDI en anglais) pour CCD<sup>[2]</sup>. Encore une fois, le moteur d'ascension droite est éteint et un logiciel spécial permet au CCD de capturer une image du ciel qui défile, une colonne de pixel à la fois, à la même vitesse que le ciel passe devant de la puce<sup>[3]</sup>. Comme chaque colonne successive de pixels est lue, ses valeurs sont ajoutées ou une moyenne est calculée par rapport au pixel de la même ligne dans la colonne précédente. Si le CCD a 2000 pixels sur la largeur de balayage, alors l'image de TDI aura 2000 fois la sensibilité d'un seul pixel. De larges bandes de ciel nocturnes peuvent être acquises en utilisant cette technique. Le TDI est tout simplement une méthode différente d'aborder la puce CCD, mais l'utilisation des méthodes de flat du dôme ou du ciel s'appliquent encore.

### Éclairage uniforme

Lorsque l'on compare l'éclairage entre des flats du ciel et des flats du dôme, les flats du ciel ont un problème inhérent parce que le



Problème du flat frame entraîné par un changement de la mise au point (foyer).

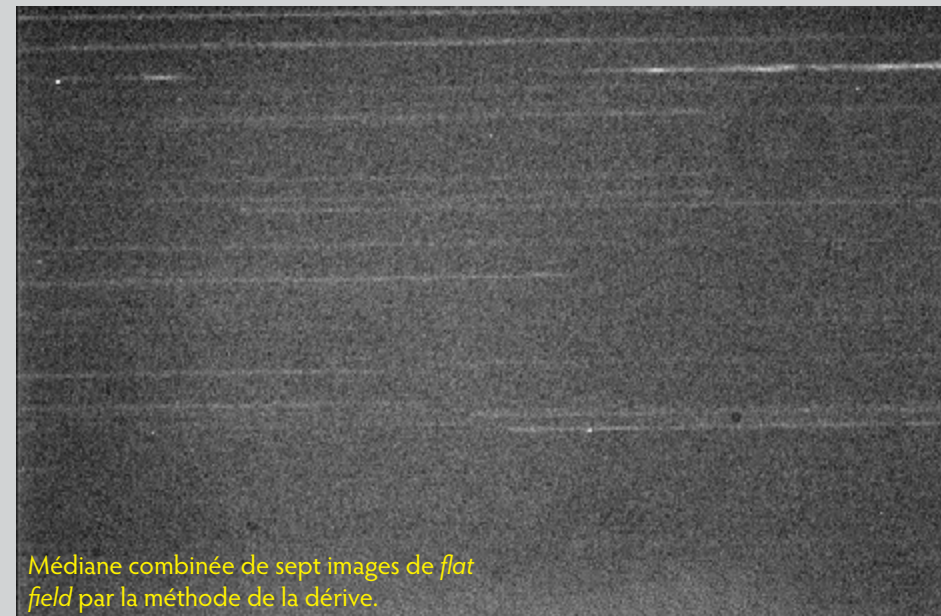
soleil n'illumine le ciel que d'une seule direction. Étant donné que le soleil ne se trouve qu'à un seul horizon, le flat field est éclairé d'un seul côté. Pour les télescopes avec un petit champ de vision, cela n'est pas un gros problème. Mais pour les télescopes à grand champ de vision, comme une lunette à grand champ ou une caméra de Schmidt, il y a une augmentation détectable de luminosité du soleil de l'image de flat field. Un autre problème avec les flats du ciel sont ces satanées étoiles — le ciel en est plein ! Il y a deux façons d'enlever les étoiles de vos images flat field. La première consiste à mettre celles-ci hors-foyer. Le problème de cette méthode est qu'elle introduit une autre variable dans le système optique.

Pour tester cette théorie, deux images de flat field ont été prises à travers un télescope, la seule différence entre les deux images étant que le foyer de l'appareil a été modifié. Si les deux images sont identiques, la différence arithmétique entre les deux images

devrait être égale à zéro ; une image toute noire. L'image ci-dessous montre un modèle précis de la différence arithmétique entre les deux images. De toute évidence, le changement de foyer du télescope a aussi changé les propriétés d'éclairage du flat field.

Une autre méthode d'élimination des étoiles à partir d'images de flat field est de prendre une médiane de plusieurs images de flat field. La médiane va supprimer les valeurs de pixels les plus élevées et les plus basses pour chaque ensemble de pixels. Puisque les étoiles représentent les valeurs les plus élevées, les pixels contenant des étoiles seront soustraits de l'ensemble de l'image en utilisant la méthode de médiane combinée. L'image du haut de la page suivante représente la médiane combinée de sept images de flat field. La méthode du balayage à la dérive a été utilisée, et les images ont été prises au zénith avec un temps d'exposition de 200 secondes chacune. L'inconvénient évident du processus de médiane combinée est que, parfois, des traînées d'étoiles dans une image chevauchent les mêmes pixels que les traînées d'étoiles dans une autre image. La plus brillante des deux traînées d'étoiles est éliminée par la médiane combinée, mais la traînée d'étoiles la moins lumineuse demeure et devient partie intégrante des valeurs médianes des pixels.

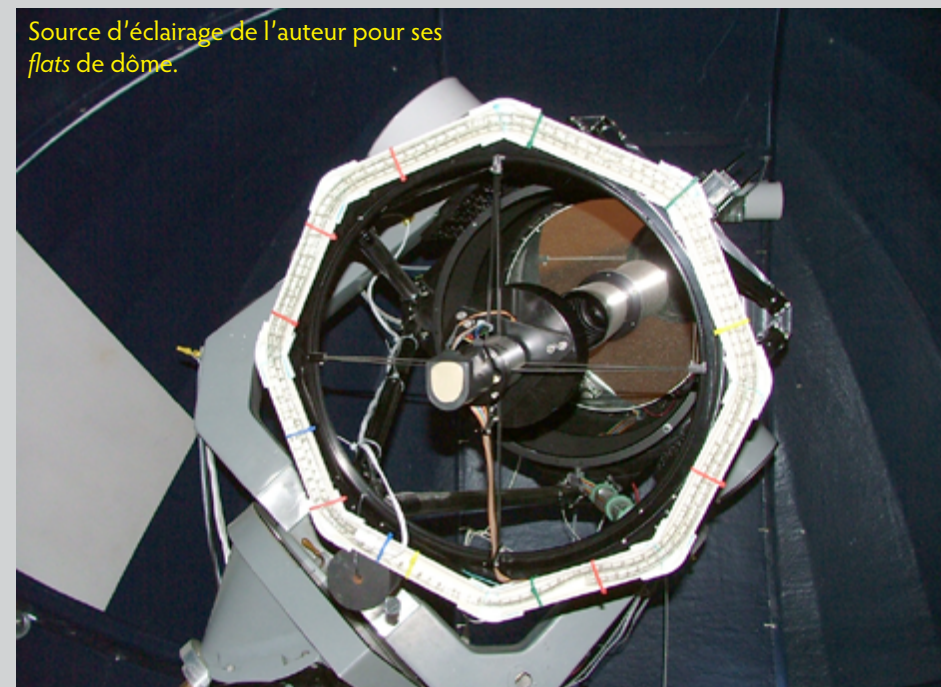
Le flat du dôme, d'autre part, dépend de l'éclairage uniforme d'une surface réfléchissante placée à une courte distance devant le télescope pour fournir



Médiane combinée de sept images de flat field par la méthode de la dérive.

un champ lumineux éclairé de façon uniforme pour l'exposition du flat field. Puisque le télescope est normalement focalisé à l'infini, la surface réfléchissante est, par sa nature même, hors-foyer. Par conséquent, la moyenne des erreurs subtiles dans l'illumination du réflecteur est calculée. On utilise typiquement plusieurs sources lumineuses placées sur le pourtour de l'instrument et dirigées vers le réflecteur afin de fournir un éclairage diffus et ample. L'image

ci-dessous montre la source d'éclairage de l'auteur pour ses flats de dôme. Ici, l'éclairage est assuré par une série de petites lampes à incandescence espacées d'environ 1" (25 mm) chacune et enfermées dans un tube de vinyle. Les ampoules sont alimentés par une alimentation à tension régulée. Ce dispositif est commercialisé sous le nom de « cordon lumineux » (rope light en anglais) et est utilisé pour l'éclairage décoratif. À l'arrière-plan, à gauche, le réflecteur peut



Source d'éclairage de l'auteur pour ses flats de dôme.

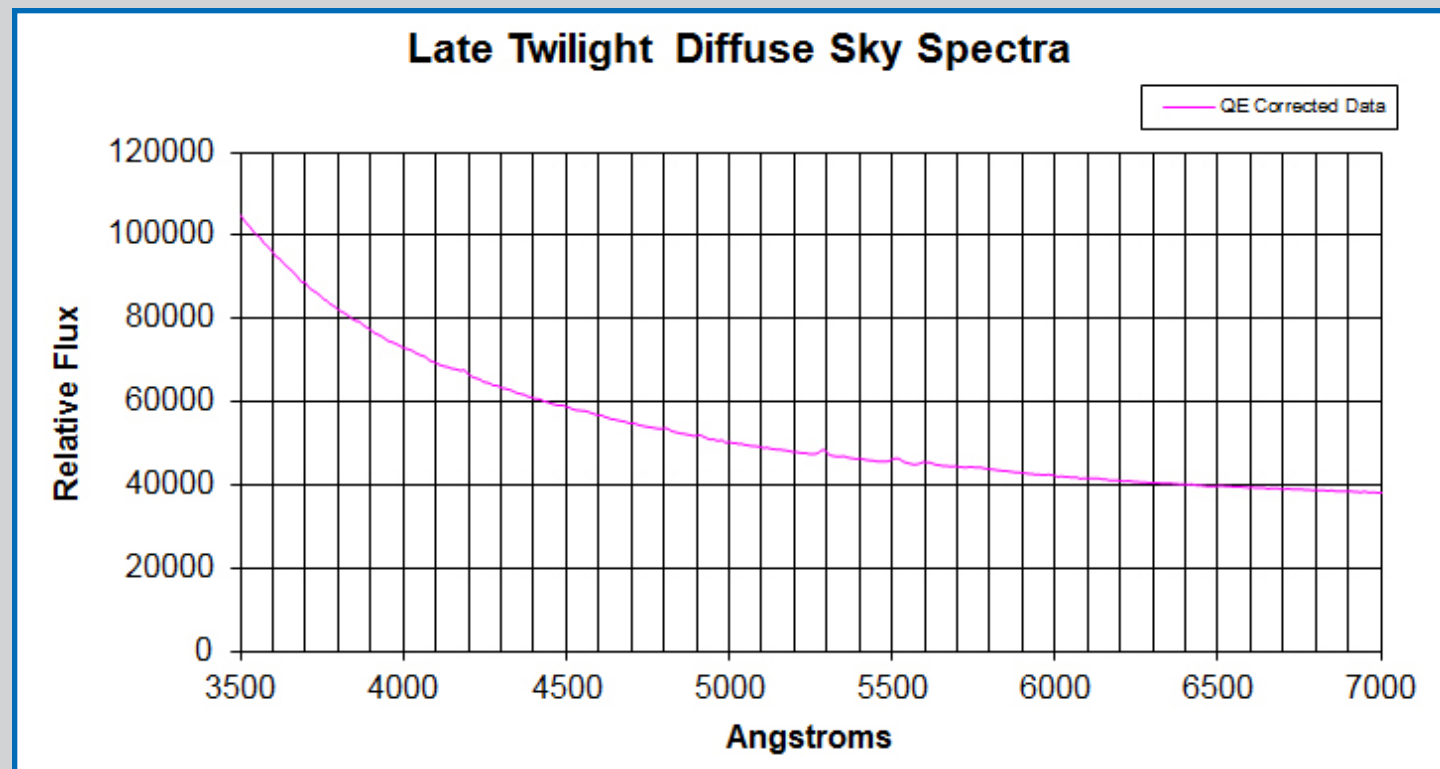
être vu à l'intérieur de la coupole de l'observatoire. Le télescope est pointé vers le réflecteur et l'éclat du cordon lumineux est reflété dans l'ouverture du télescope. Cela fournit un éclairage uniforme du train optique. En pratique, un drap noir est drapé sur la cage du télescope pour empêcher toute lumière parasite de pénétrer dans le train optique du télescope lors de l'imagerie du flat field.

### Longueur d'onde suffisante

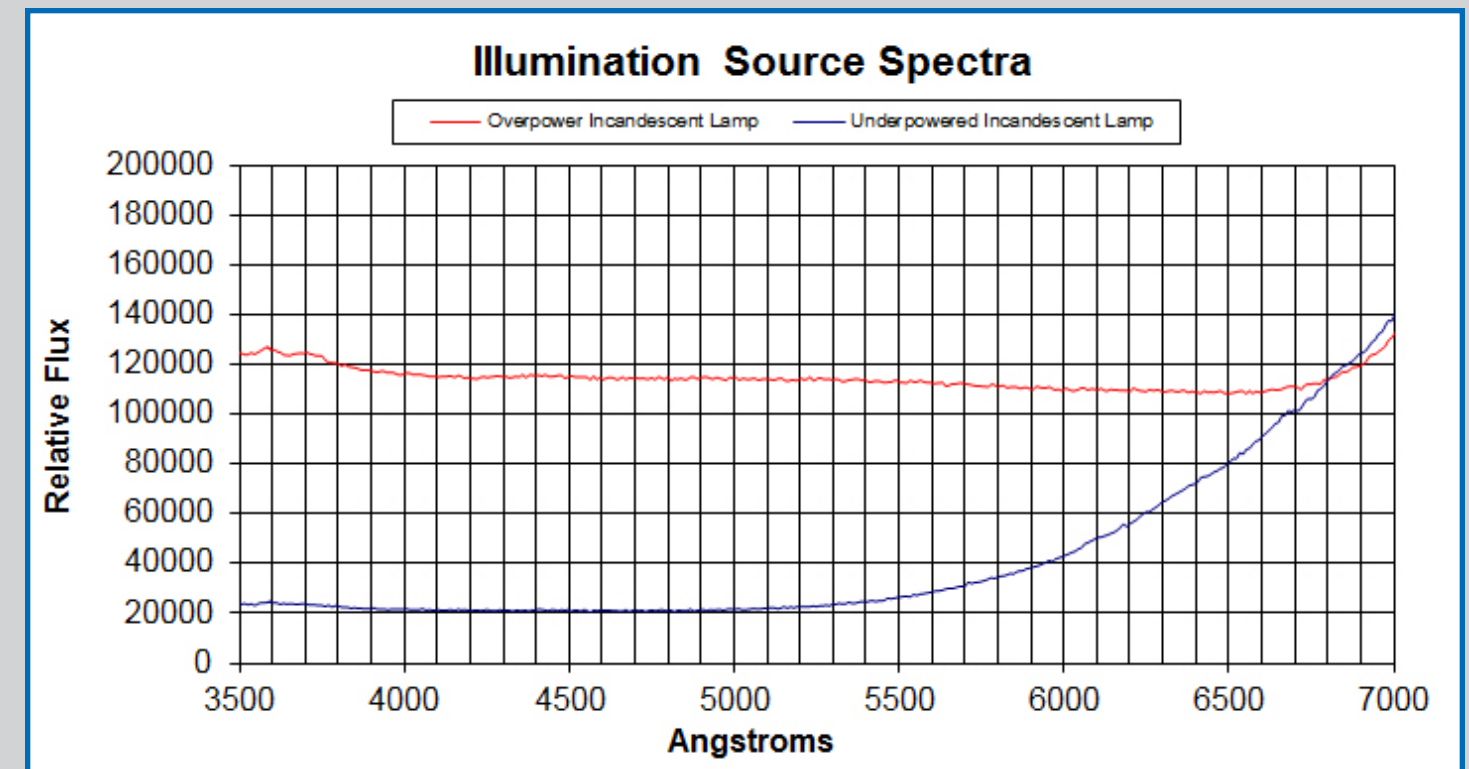
Il est important que la sortie spectrale de la source d'éclairage corresponde à la réponse spectrale du détecteur. Le ciel crépusculaire semble bleu à l'œil humain, mais un spectrogramme diffus du ciel crépusculaire au zénith pris par l'auteur montre que le ciel contient aussi un niveau élevé d'infrarouges (IR) à ondes longues, soit environ 7000 angströms ; voir le graphique au haut de la page suivante.

La lumière visible du ciel crépusculaire est tout de même suffisante pour agir comme une excellente source d'éclairage du cadre de flat field.

L'éclairage de flat field en corde lumineuse utilisé par l'auteur est essentiellement un corps noir. Lorsque sous-alimenté (à une tension inférieure à celle spécifiée par le fabricant), la sortie principale de chaque lampe est dans l'IR. Lorsque suralimenté (au-dessus de la tension nominale du fabricant), chaque lampe a encore une sortie IR significative, mais le rayonnement dans le spectre visible devient un continuum plat ; voir le graphique au haut de la page 10.



Spectre du ciel crépusculaire dégagé au zénith (pris par l'auteur).



Spectres des lampes à incandescence utilisées pour éclairer l'écran du *flat field* du dôme (pris par l'auteur). Le graphique montre des spectres riches en IR pour les lampes à faible puissance, tandis qu'une réponse presque plate est obtenue dans le spectre visible lorsque l'appareil est utilisé à plus forte puissance.

Par conséquent, lors de la prise de *flats* dans les bandes R, Ha et IR, la lampe est utilisée à faible puissance. Pour les *flats* de la bande B, les lampes sont alimentées à une tension tout juste supérieure à la tension nominale maximale.

### Revêtement du réflecteur de dôme

Un autre à considérer pour les *flats* de dôme est le réflecteur lui-même. Si la source d'éclairage a une sortie spectrale large, mais que le réflecteur n'a qu'une réflectivité sélective, la CCD ne captera pas le spectre complet de la source. De nos jours, toutes les peintures blanches commerciales tirent leur pigmentation du dioxyde de titane. Bien que ce pigment semble blanc à l'œil humain, sa réponse spectrale est beaucoup plus rouge que le bleu<sup>[4]</sup>. La solution pour cela consiste à enduire le réflecteur d'un pigment qui a une réponse spectrale

uniforme; le sulfate de baryum est un pigment approprié. C.C. Wu a détaillé l'utilisation du sulfate de baryum dans son article sur la conception d'un sensitomètre<sup>[5]</sup>. Wu a concocté une formule de peinture dans laquelle le sulfate de baryum est dispersé dans un liant d'alcool vinylique. La formule de peinture était problématique parce que l'alcool vinylique rend le liant inférieur et présente une mauvaise stabilité à long terme à la lumière ultraviolette. Il a aussi une mauvaise adhérence aux substrats non poreux.

L'auteur a mis à jour la formule de Wu en utilisant du sulfate de baryum précipité, du « blanc fixe », et a remplacé l'alcool vinylique avec une base de polymère de polyuréthane aliphatique moderne. Le blanc fixe a une luminosité de surface plus élevée que le sulfate de baryum, et le polymère d'uréthane fournit une résistance à la lumière et une

excellente adhérence à la plupart des surfaces propres. Ce revêtement a été utilisé pour tous les *flats* de dôme produites de cet article.

### Disponibilité de la source d'éclairage

Les *flats* de dôme ont l'avantage qu'ils peuvent être pris à tout moment au cours de la séance d'observation. Il est souvent nécessaire de faire tourner la caméra en vue d'acquérir une étoile guide appropriée ou pour bien cadrer un objet. La rotation de la caméra crée un changement dans le train optique du télescope et nécessite qu'une nouvelle série d'images de *flat field* soit prise. Il est difficile, voire même impossible, de planifier et d'acquérir des *flats fields* pour différentes combinaisons de rotation de la caméra et de filtres en utilisant la fenêtre de temps courte offerte par les *flats* de ciel avant ou après une session d'imagerie.

### Conclusion

Parce les *flats* du ciel sont pratiques et peu coûteux à produire, ils sont souvent utilisés par l'astronome amateur pour la correction d'images CCD. Mais parce les *flats* du ciel ne peuvent être produits que pendant une courte période de temps avant et après la soirée d'observation, ils ne sont pas pratiques lorsque des rotations de caméra et des configurations de filtres plus complexes sont utilisées. Les *flats* du ciel manquent également de l'uniformité d'un côté à l'autre pour les télescopes à grand champ. Les *flats* de dôme offrent plus de polyvalence à l'astronome pour prendre des images de terrain plat avant, pendant ou après la session d'observation. Les *flats* de dôme offrent également une source d'éclairage uniforme pour prendre des *flats* avec des télescopes à grand champ et peuvent donc produire

des données d'une précision supérieure aux *flats* de ciel.

### Références

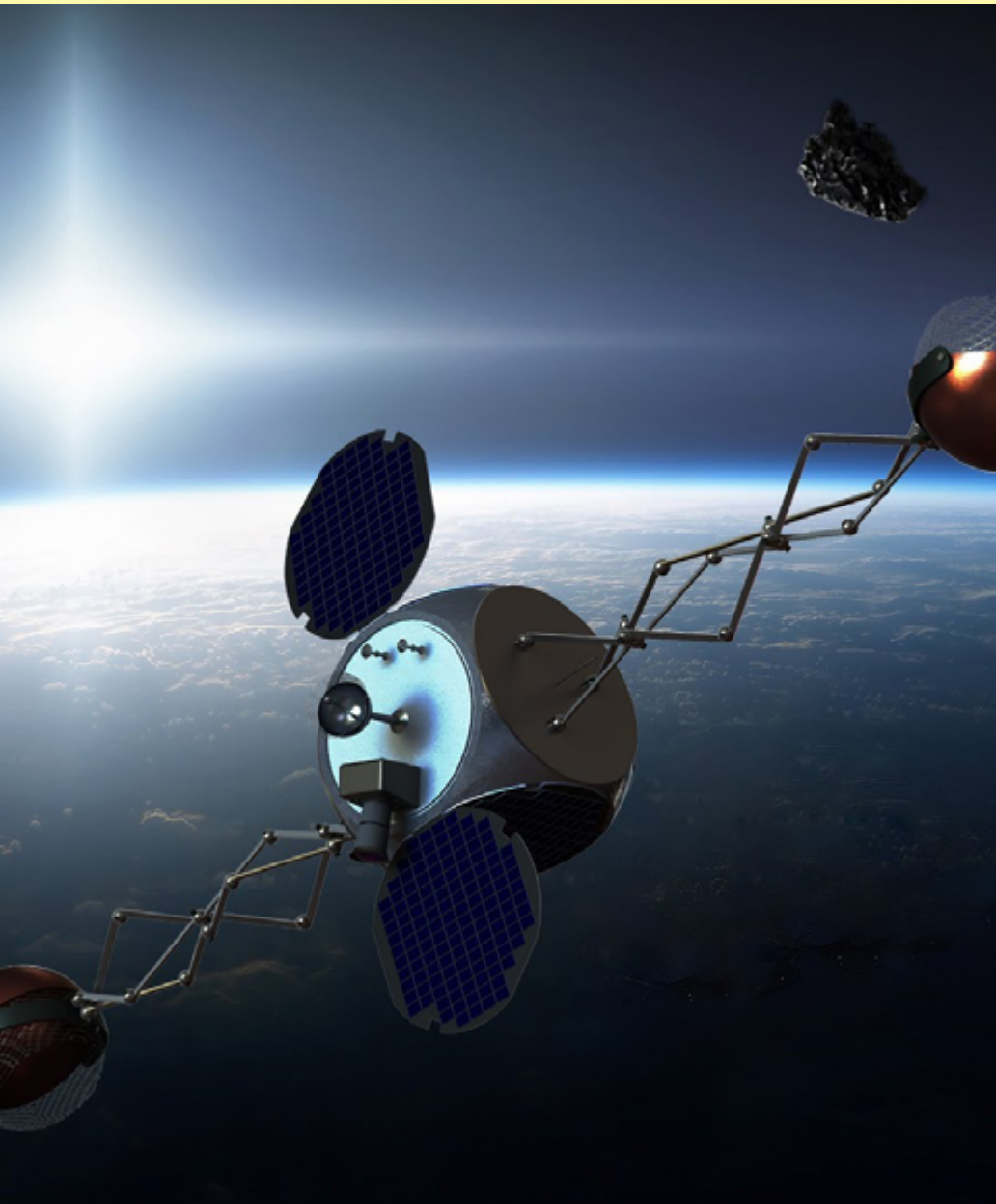
1. JANESICK, James R. *Scientific Charge Coupled Devices*. Washington, SPIE Press, 2001, 920 pages, ISBN 978-0819436986.
2. GIBSON, Brad K. et Paul HICKSON. « Time-delay integration CCD read-out technique: image deformation », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* vol. 258, n° 3, 1<sup>er</sup> octobre 1992, p. 543–551.
3. FLOHR, Christoph. *Drift Scan Imaging*. <http://www.driftscan.com/> · Mis à jour le 17 août 2003.
4. MASSEY, Philip et George H. JACOBY. « CCD Data: The

Good, the Bad, and the Ugly ». *Astronomical CCD Observing Techniques, ASP Conference Series* vol. 23, 1992. Steve Howell, éd.

5. WU, C.-C., C.M. ANDERSON, J.D. ROSENTHAL, L.W. MARTY, et D.W. BUCHOLTZ. « The design of a spot sensitometer for astronomical use ». *American Astronomical Society, Photo-Bulletin* vol. 5, no. 1 (1972), p. 9–12.

Donn Starkey est conseiller pour l'American Association of Variable Stars Observers (Association américaine des observateurs d'étoiles variables). Ce texte, jusqu'ici inédit dans son intégralité, a été écrit en 2005. M. Starkey l'a gracieusement offert aux lecteurs d'*Astronomie-Québec*. On peut lire la version originale en anglais au <http://astronomie.quebec/starkey>

# Débris cosmiques : L'affluence du ciel



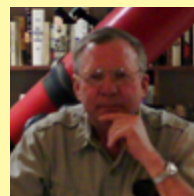
Le concept de satellite Sling-Sat. Crédit : Jonathan Missel / Texas A & M University

De nombreux satellites exerçant des fonctions différentes partagent le même espace bondé et se croisent et se recroisent chaque jour, tout en gérant des communications commerciales et militaires, en prenant des images de la terre (télé-détection), en observant les conditions météorologiques, et en nous envoyant nos émissions de télévision préférées.

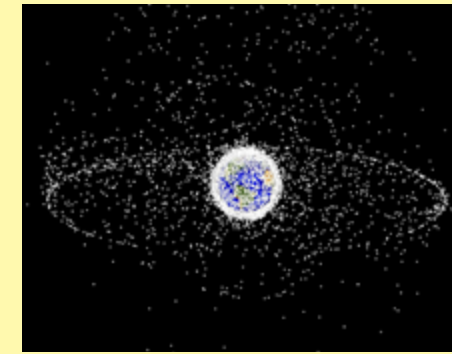
## Types de champs de débris orbitaux

Si un satellite est en orbite autour de la Terre dans la région générale au-dessus de l'atmosphère terrestre (environ 160 km), mais sous la ceinture de radiation intérieure de Van Allen (environ 2000 km), il est dans ce que l'on appelle une « orbite basse » (*Low Earth Orbit* ou LEO en anglais). Cette zone est de plus en plus encombrée de satellites morts, d'étages de poussée finale jetés, de coquilles de protection vides, et d'autres débris d'origine humaine qui se sont accumulés au cours des 58 années depuis que le premier satellite artificiel a été lancé.

Un problème similaire existe dans la zone équatoriale de satellites en orbite géostationnaire (GEO), à environ 35 786 km au-dessus de la Terre, où les satellites en orbite demeurent stationnaires, voyageant à peu près d'est en ouest, au-dessus d'un point donné de l'équateur terrestre. Leur période orbitale est égale à un jour sidéral terrestre. Plutôt que de former un nuage de débris comme celui de l'orbite basse, les objets géostationnaires forment un anneau au-dessus de l'équateur. Cependant, tous n'ont



Collaboration spéciale de Doug Turnbull



Débris géostationnaires. Crédit : NASA.

pas une orbite géosynchrone (OSG) au-dessus de l'équateur ; certains ont une orbite polaire, voyageant à peu près du nord au sud.

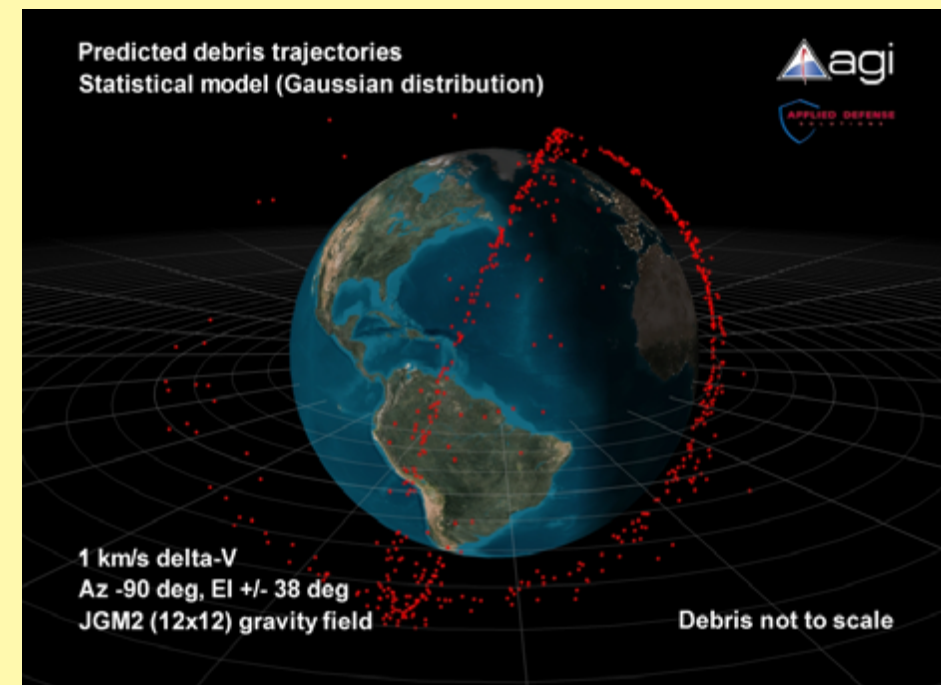
## Collision Iridium-Kosmos

Un exemple des conséquences de la surpopulation qui a eu lieu en orbite basse est la destruction du satellite commercial de communication américain Iridium 33 — plutôt cher et entièrement fonctionnel — en 2009, par un impact à vitesse très élevée (42120 km/h) avec un satellite inactif russe

de communications militaires, Kosmos 2251. L'accident est survenu à une altitude de 789 km, et les deux objets se déplaçaient sur des trajectoires presque exactement perpendiculaires l'une à l'autre.

En 1978, le Dr Donald Kessler (<http://webpages.charter.net/dkessler/>), scientifique à la NASA, prédit la possibilité que des collisions comme l'accident des satellites de communication Iridium-Kosmos, pourrait entraîner un effet de cascade, un phénomène aujourd'hui appelé « syndrome de Kessler », dans lequel chaque collision crée beaucoup plus de projectiles, qui se heurtent ensuite à plusieurs objets, créant encore plus de projectiles, jusqu'à ce que l'orbite basse devienne effectivement non navigable.

L'image ci-dessous montre la prédiction du champ de débris



Trajectoires d'Iridium 33 et de Kosmos 2251, et champ de débris Crédit : Analytical Graphics, Inc. (<http://www.agi.com>).

résultant de l'impact entre les satellites Iridium 33 et Kosmos 2251.

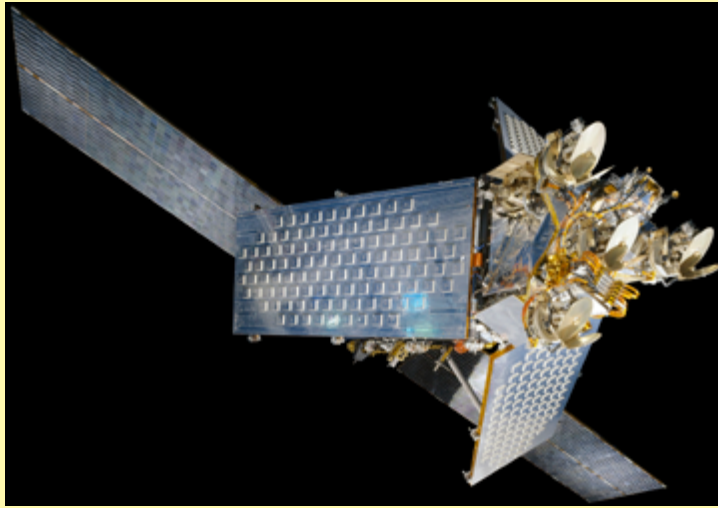
Bien que la NASA ait estimé que l'impact des satellites Iridium et Kosmos ait créé au moins 1000 objets d'une taille de 10 cm ou plus ainsi que de nombreux objets plus petits, elle a conclu que les débris ne représentaient aucune menace pour la Station spatiale internationale ou les missions de navette spatiale qui ont suivi, en raison de leur confiance dans leur capacité à suivre les nombreux débris en orbite autour de la Terre.

Je vous invite aussi à visionner la vidéo sur le mouvement des débris qui est disponible sur le site de la NASA au <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/photogallery/beehives.html>

## Code de la route orbital

Au bout du compte, les débris spatiaux sont un problème mondial, mais aucun ensemble de « règles de la route » internationales n'existe actuellement. Au lieu de cela, les orbites basses et géostationnaires sont comme des méga-autoroutes avec aucune voie tracée, limite de vitesse, ou bretelles d'accès ou de sortie à sécurité garantie. Imaginez ce que nos routes seraient s'il n'y avait pas de règles régissant le comportement des conducteurs automobiles, et vous aurez une bonne idée de la situation en orbite basse et géostationnaire aujourd'hui.

Appartient-il vraiment à la NASA, un organisme déjà chargé de nombreux objectifs, de surveiller et de contrôler le nombre sans cesse croissant de satellites et de débris spatiaux ?



Maquette du satellite Iridium. Crédit : Eric Long, National Air and Space Museum, Smithsonian Institution.

Le réseau de surveillance spatiale des États-Unis existe déjà (*Space Surveillance Network*), mais puisqu'il s'agit d'un projet du Département de la Défense, son but est avant tout de faire la distinction entre quel objet est un débris et lequel est une arme.

Le nombre de nations et de sociétés privées envoyant des satellites dans l'espace a considérablement augmenté depuis l'avènement des CubeSats<sup>[1]</sup>. Les CubeSats sont des minisatellites qui sont placés en orbite parfois à la remorque d'autres satellites, et parfois en groupes. Comme le nombre d'objets qui ont besoin d'une place dans « les routes de l'espace » continue d'augmenter, il en va de même de la quantité de débris spatiaux accessoires<sup>[2]</sup>.

Étant donné que le problème ne se limite pas aux actions d'une seule

1 On a déjà parlé, dans les pages d'*Astronomie-Québec*, du projet *SkyCube* (malheureusement un échec). Voir aussi <http://www.economist.com/news/technology-quarterly/21603240-small-satellites-taking-advantage-smartphones-and-other-consumer-technologies>

2 Pour une discussion plus complète des CubeSats, l'auteur invite à écouter son entrevue avec Rick Kwan, un expert sur les fusées et les satellites, en deux épisodes sur <http://dougturnbull.podbean.com/> (en anglais).

entre la société américaine Lockheed Martin et Electro Optic Systems, une entreprise australienne, pour suivre les 2000 satellites commerciaux et militaires existants ainsi que les quelque 300 000 morceaux de débris actuellement en orbite autour de la Terre<sup>[3]</sup>.

De toute évidence, après la catastrophe d'Iridium 33, le secteur privé a pris bonne note du problème. Cependant, aussi précieux que ce service puisse être, suivre tout simplement les objets existants ne suffit pas. Puisque tant des industries commerciales que des organismes militaires lancent des satellites, la question de la responsabilité est particulièrement aggravée quand vient le temps de déterminer qui devrait acquitter la facture, non seulement pour le suivi des débris, mais aussi pour le développement de la technologie pour toutes les nettoyages nécessaires.

### Le futur

Pour l'instant, aucun accident mortel n'a eu lieu à la suite de ce « ciel

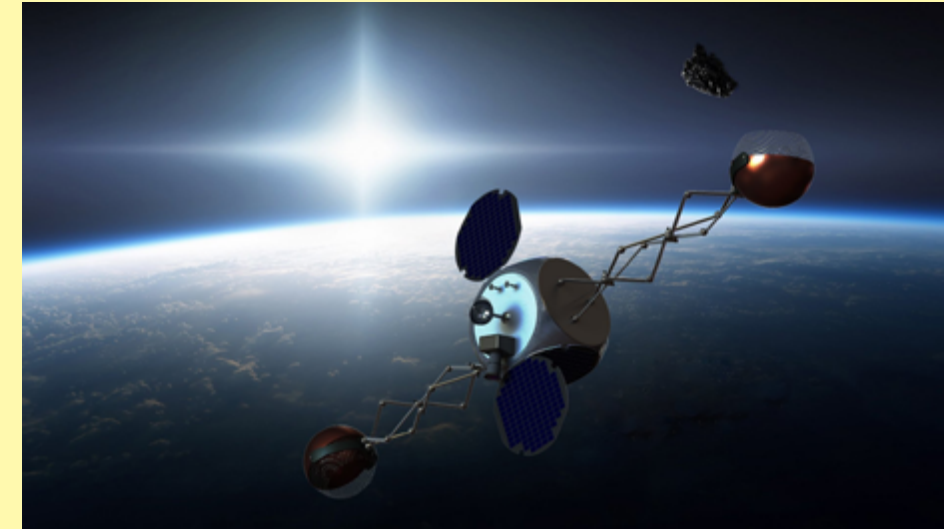
3 Voir <http://www.bbc.com/news/business-28948367>

nation, les États-Unis, la question se pose à savoir si des collaborations internationales, gouvernementales et commerciales, sont nécessaires. Un exemple est le contrat commercial international

bondé », mais je crois que d'ici à ce que le problème soit résolu, ce n'est qu'une question de temps avant qu'un tel événement n'arrive. Le vieil adage dit : « Quand vous êtes dans un trou, la première étape pour s'en sortir est d'arrêter de creuser ». Des satellites sont lancés presque chaque jour, et utilisent tous des méthodes qui augmentent le nombre de débris dans les zones précitées. N'est-il pas maintenant le temps de prendre une pause, d'examiner les options, et de dresser un plan pour contrôler les débris spatiaux ?

Je propose que les nations spatiales et les entités privées organisent un comité de représentants experts pour établir un ensemble de règles qui régiront les méthodes de livraison et les trajectoires des missions orbitales. Je suggère même une liste de quelques exemples possibles de points de départ de discussion concernant ces règles.

1. Tous les véhicules de lancement, y compris les étages de mise en orbite, doivent avoir une trajectoire de chute afin qu'ils rentrent dans l'atmosphère et y brûlent.
2. Si l'étage de mise en orbite termine son travail dans une orbite permanente avec sa charge utile, il doit être équipé d'un système de rétropoussée pour le placer sur une trajectoire de chute.
3. Tous les nouveaux satellites doivent avoir un échancier de chute planifiée afin qu'ils rentrent dans l'atmosphère lorsque leur mission est terminée. Un système de rétropoussée doit être installé si l'orbite est telle



Concept de « satellite-nettoyeur » Sling-Sat. Crédit: Jonathan Missel / Texas A & M / space.com.

que sa dégradation naturelle ne se produira pas dans un temps spécifié.

4. Tous les nouveaux satellites doivent être placés dans les zones de stationnement, dont l'emplacement sera déterminé par le comité d'experts.
5. La règle numéro 4 créerait des couloirs de sécurité pour les missions orbitales habitées de même que pour les missions transorbitales habitées et inhabitées, et aiderait au suivi des satellites.
6. Des méthodes économiques d'élimination des objets dangereux qui ne retomberont pas par eux-mêmes devront être étudiées et mises en œuvre si jugées pratiques. Le système d'élimination des débris spatiaux *Sling-Sat*, proposé par la Texas A & M, est une possibilité<sup>[4]</sup>. L'emploi de lasers pour pousser les petits objets sur des orbites de chute est une autre possibilité exploré par la NASA<sup>[5]</sup>.

4 Voir par exemple <http://www.space.com/20024-space-junk-removal-sling-sat.html>

5 Voir à ce sujet <http://www.technologyreview.com/view/423302/nasa-studies-laser-for-removing-space-junk/>

Ce sont quelques règles possibles pour l'accès aux orbites basses et géostationnaires. Les arguments contre ces règles concerneront principalement les coûts accrus. Les systèmes de rétropoussée sont un « poids mort » et réduiront donc la capacité de charge utile. Les « voies spéciales » pour les satellites peuvent nécessiter un compromis pour la mission, auquel les planificateurs de mission voudront résister. Cela affecte en particulier les missions militaires, et ces missions peuvent être la principale source de non-conformité. En outre, certains pays peuvent se retirer de la convention, ou simplement ne pas y adhérer. La Chine résiste particulièrement à tout type d'implication internationale dans son programme spatial. Toutefois, les entités non-participantes peuvent reconnaître le danger, comme Lockheed Martin le fait déjà, et participer éventuellement à l'effort comme une question d'intérêt propre. Les principales agences spatiales du monde ont formé l'Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (*Comité*

*interagences de coordination des débris spatiaux*, IADC) pour résoudre les problèmes liés aux débris orbitaux et favoriser les opérations en orbite terrestre, ce qui limite la croissance des débris orbitaux, mais n'a pas encore formulé ou convenu d'un accord international.

L'acceptation de plein gré d'un protocole international par tous les participants ou la plupart n'est pas sans précédent historique. Les Conventions de Genève de 1864, 1906, 1929 et 1949 régissant le traitement humain des prisonniers sont des exemples d'un tel arrangement<sup>[6]</sup>. Bien qu'elles ne soient pas uniformément suivies, les règles ont été observées par la plupart des nations combattantes dans les années suivant leur création. La Convention des Nations Unies sur le droit de la mer est un autre exemple<sup>[7]</sup>. Compte tenu de ces précédents, il y a tout lieu de croire que la plupart des entités spatiales verraient une telle convention comme avantageuse et travailleraient donc pour en faire un succès.

6 [http://www.law.cornell.edu/wex/geneva\\_conventions](http://www.law.cornell.edu/wex/geneva_conventions)

7 [http://www.dfo-mpo.gc.ca/international/media/bk\\_unclos-fra.htm](http://www.dfo-mpo.gc.ca/international/media/bk_unclos-fra.htm)

Hôte du podcast hebdomadaire de science spatiale *Mars Pirate Radio* (<http://dougturnbull.podbean.com/>), Doug Turnbull est un écrivain de science-fiction « dure » dont la plupart des livres, romans, et histoires courtes confrontent aux problèmes rencontrés par les premiers colons d'autres mondes. Il a offert cet article gracieusement aux lecteurs d'*Astronomie-Québec*. Son site Web est le <http://www.dougturnbull.com/>

[technologyreview.com/view/423302/nasa-studies-laser-for-removing-space-junk/](http://www.technologyreview.com/view/423302/nasa-studies-laser-for-removing-space-junk/)

# Le plus grand océan est sur Ganymède



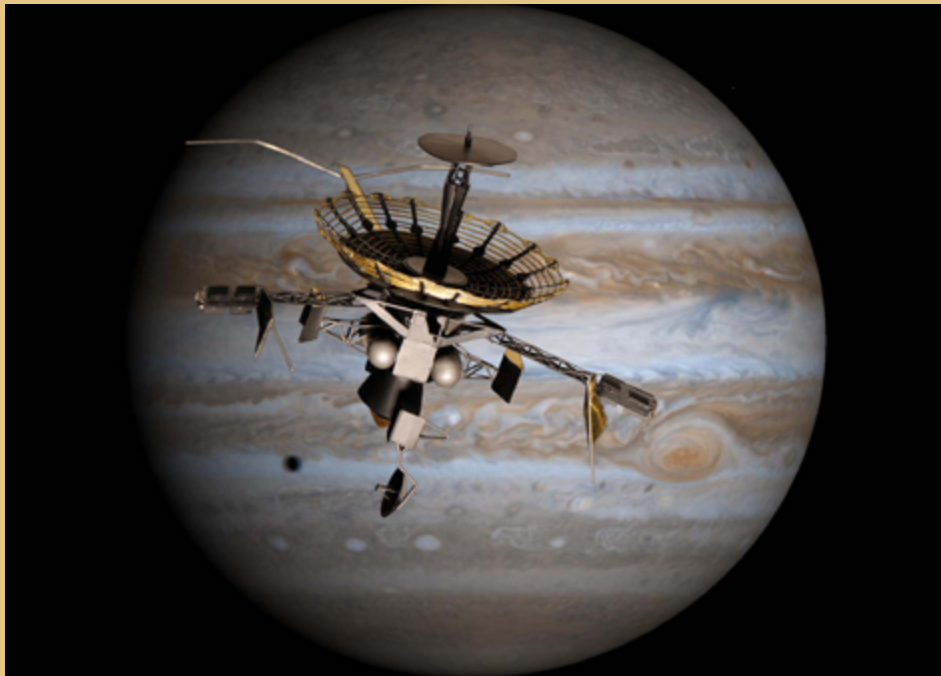
*Ceux qui pensaient que les plus riches réservoirs d'eau salée se trouvent sur la Terre devraient réfléchir à nouveau, puisqu'il est maintenant certain que sur Ganymède, le plus grand satellite naturel de notre système solaire, se trouve un océan souterrain dont le volume est supérieur à celui de tous nos océans réunis. Une nouvelle extraordinaire du point de vue astrobiologique.*

Ganymède photographié par la sonde Galileo en 1996. Cette lune recèle sous sa surface le plus grand océan du système solaire. Crédit photo : NASA, Ted Styrk.

Jusqu'à il y a quelques décennies, il était difficile d'imaginer qu'il puisse avoir, dans le système solaire, de l'eau liquide sur d'autres corps planétaires que la Terre. On savait qu'il y en a dans les comètes sous forme de glace, et on soupçonnait qu'il y en aurait un peu, dans ce même état, sur Mars, et seuls les astronomes les plus optimistes espéraient un jour être en mesure d'en trouver sur certaines grandes lunes. Les modèles informatiques des années 70 indiquaient que sur Ganymède — le plus grand satellite naturel de Jupiter (et de tout le système solaire), dont le diamètre est supérieur à celui de la planète Mercure —, on puisse trouver un océan global caché sous une couche de surface très épaisse composée de roches et de glace. Comme on peut facilement le deviner, le temps n'était pas encore arrivé pour que les astronomes aient les instruments nécessaires pour une éventuelle vérification de cette hypothèse, et la question est donc restée en suspens. Par la suite, en 2002, la sonde Galileo a visité le système de Jupiter et a étudié la planète et ses satellites pendant quelques années.

Grâce à une série de mesures prises avec les instruments de bord, dont un compteur de particules chargées et un magnétomètre, les astronomes ont découvert que Ganymède possède son propre champ magnétique (le seul cas parmi les satellites), bien que plongé dans l'immense magnétosphère de Jupiter. L'existence d'un champ magnétique autour de cette lune était essentielle pour valider les modèles, et l'avoir découvert est un premier pas concret vers la confirmation de l'existence de son

Collaboration spéciale  
de Michele Ferrara,  
Free Astronomy Magazine

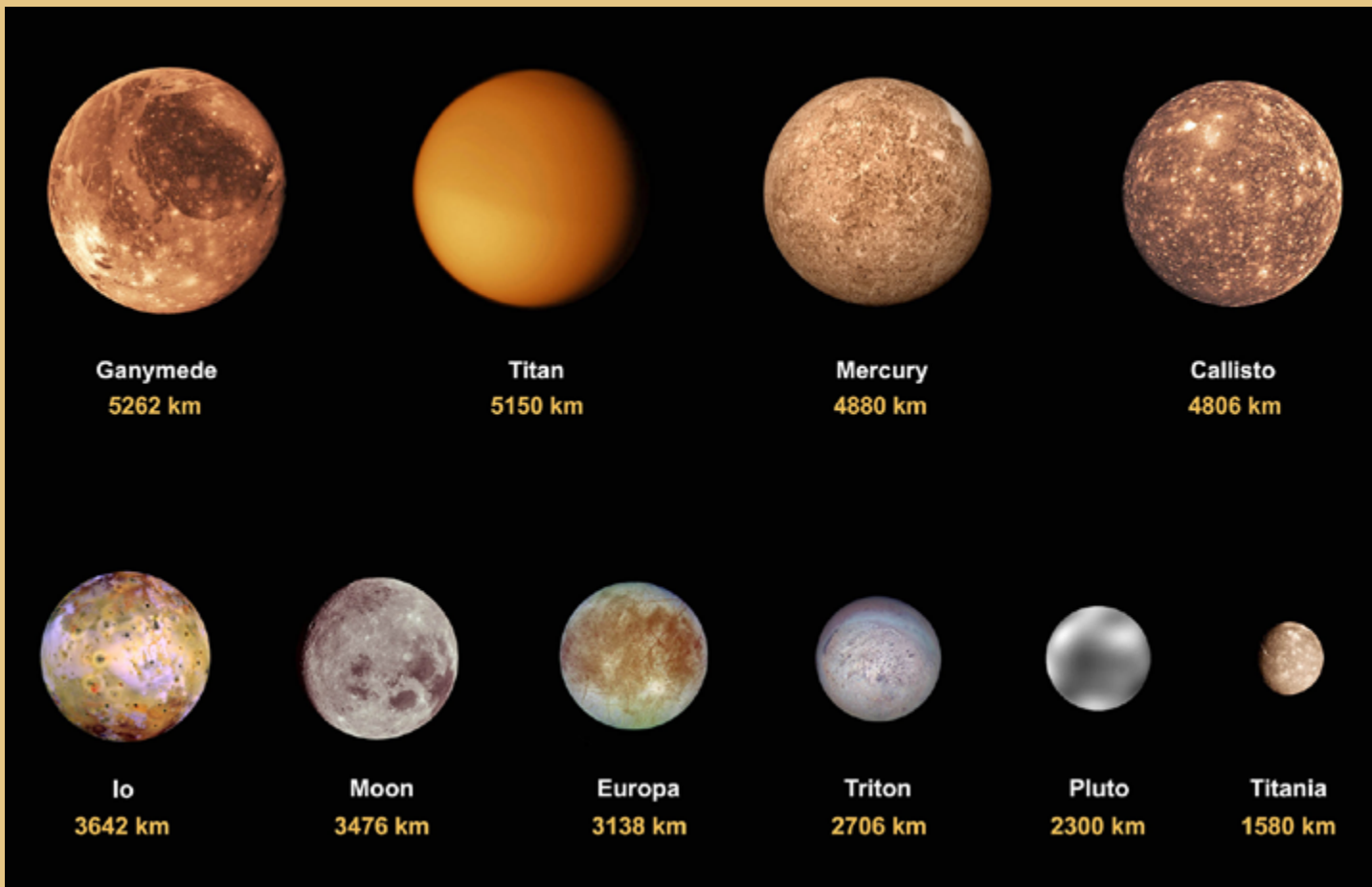


Ci-dessus, une vue d'article de la sonde Galileo dans le système jovien. Crédit : NASA.

Ci-dessous, comparaison des tailles des plus grands satellites du système solaire, de Mercure et de Pluton. Crédit : NASA, Calvin J. Hamilton.

océan. Mais il n'a pas été possible d'aller plus loin, parce que les mesures, effectuées pendant de courtes périodes à intervalles de 20 minutes, ont été trop brèves pour mettre en évidence avec certitude

une interférence particulière dans le comportement du champ magnétique de Ganymède, attendue dans le cas de l'existence de l'océan. Cette interférence fait partie d'un cadre plus large dont l'élément dominant est le champ magnétique de Jupiter, qui tourne « solidement » avec la planète sur une période d'environ 10 heures. Pendant la moitié de ce cycle, les lignes de force du champ pointent environ vers Ganymède, tandis que pendant l'autre moitié, elles pointent en direction opposée (par rapport à l'axe de rotation de la planète). Ceci affecte la structure du champ magnétique de Ganymède (créé par la rotation de son noyau de fer), dont l'axe est forcé à osciller, ce qui fait à son tour changer la latitude des phénomènes qui lui sont associés (dans les deux hémisphères).



Les modèles prédisent que dans le cas de Ganymède, ces oscillations sont de  $6^\circ$  vers le nord, puis de  $6^\circ$  vers le sud, dans un cycle d'environ 10 heures (qui coïncide avec la rotation de Jupiter). Ceci est le scénario attendu dans le cas où la grande lune est entièrement solide et donc sans océan souterrain global.

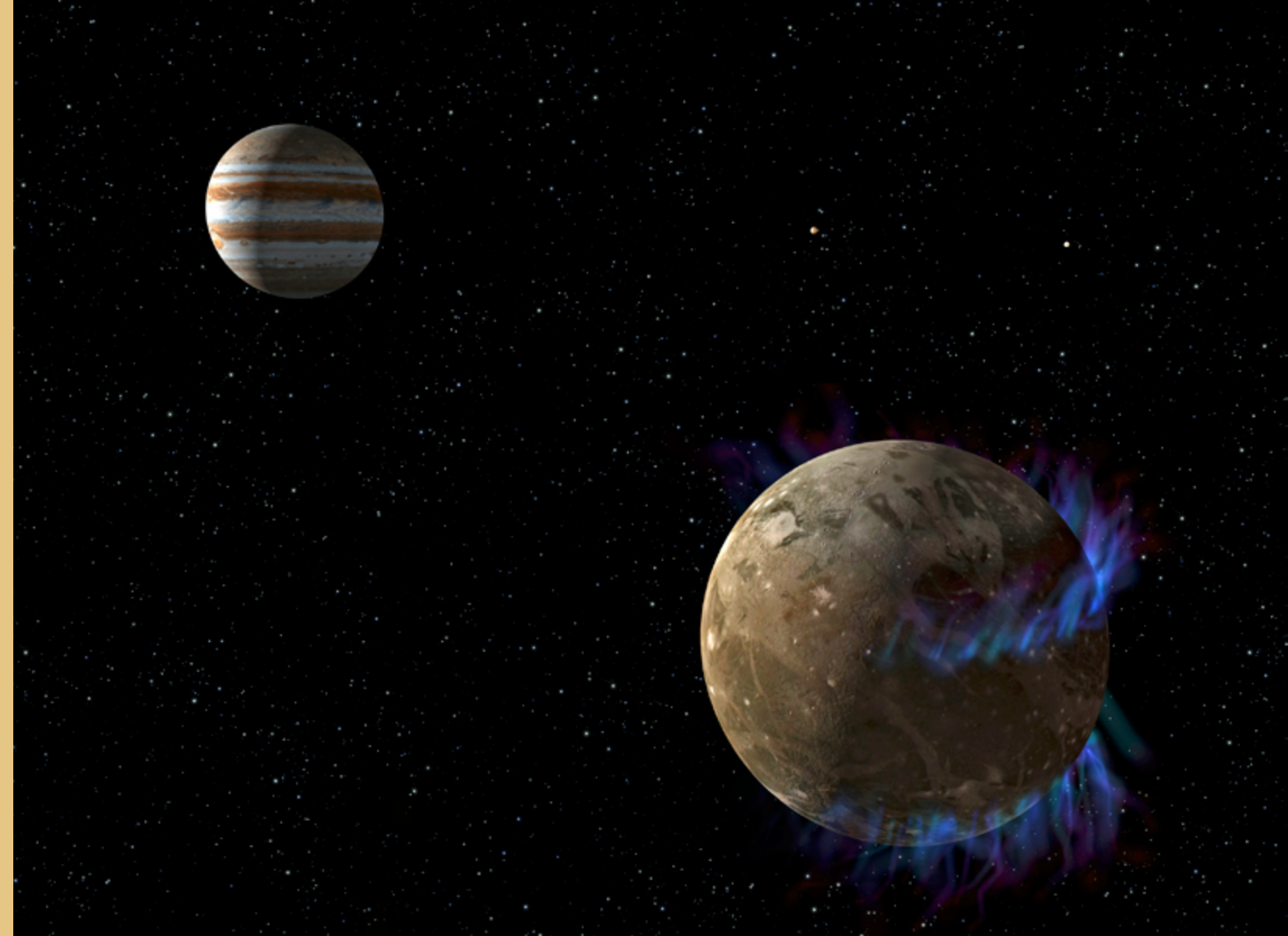
À l'inverse, en présence d'un énorme réservoir d'eau salée liquide, sa masse, sa fluidité et sa conductivité électrique modifieraient la dynamique du champ magnétique de Ganymède en introduisant un effet inhibiteur sur l'influence de la magnétosphère jovienne et réduirait

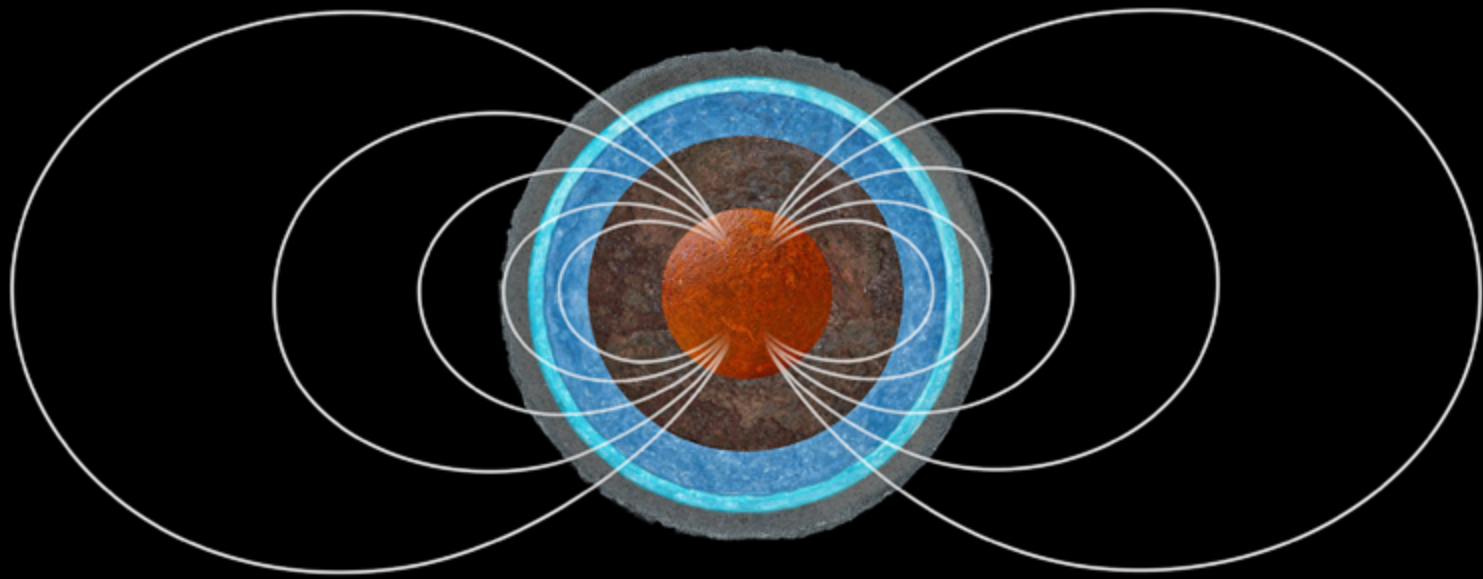
considérablement l'amplitude des oscillations.

De réussir à mesurer une migration en latitude moindre que les  $6^\circ$  théoriques aurait validé l'hypothèse de l'océan global, et l'amplitude de la différence aurait fourni des informations précieuses sur ses principales caractéristiques. En l'absence d'une sonde in situ, convenablement conçue et équipée pour étudier à long terme le comportement du champ magnétique de Ganymède, il semble impossible de donner une réponse définitive à cette question. Mais puisque les scientifiques sont habitués de trouver des solutions inhabituelles, il n'est pas surprenant

Vue d'artiste de Ganymède en orbite autour de Jupiter, avec mise en évidence des deux ovales auroraux découverts aux latitudes moyennes dans les hémisphères nord et sud. Le télescope spatial Hubble a mesuré les fluctuations qui affectent ces structures, ce qui a conduit à la découverte d'un immense océan souterrain. Crédit : NASA, ESA, G. Bacon (STScI), J. Saur (Université de Cologne, Allemagne).

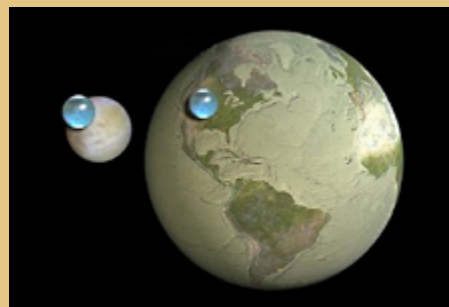
que Joachim Saur, professeur de géophysique à l'Université de Cologne en Allemagne, ait eu cette belle idée : étudier la structure interne de Ganymède en observant ses aurores. C'est bien connu, les champs magnétiques sont invisibles et leurs lignes de force, ainsi que leur polarité, sont essentiellement reconnaissables par la présence



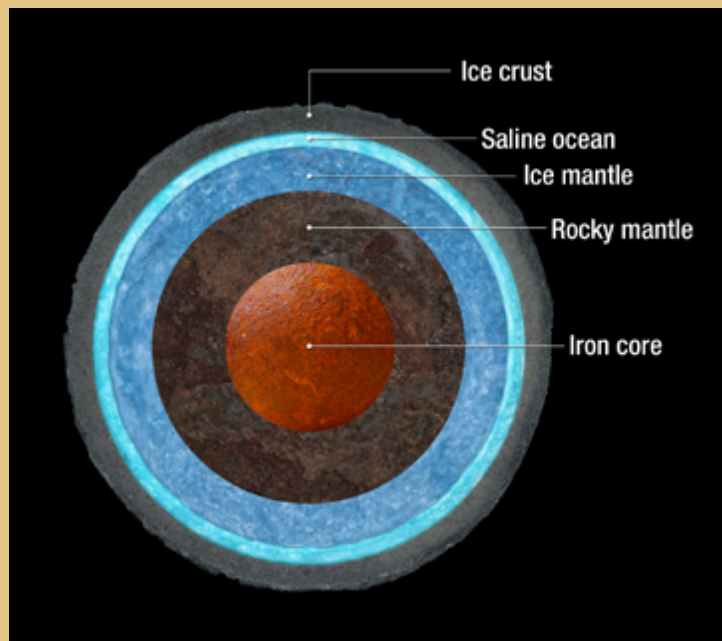


Ci-dessus, une représentation très simplifiée des lignes de force du champ magnétique de Ganymède, généré par la rotation du noyau de fer liquide.

Ci-contre, comparaison entre la quantité d'eau contenue dans l'océan de Ganymède et celle des océans de la Terre : la première est plus grande.



Ci-dessous, schéma de la structure interne de Ganymède selon de récents travaux de Saur et ses collègues, publiés en mars dans le *Journal of Geophysical Research*. L'océan d'eau salée sous la croûte de glace, se trouve au-dessus d'une couche de glace, d'un manteau rocheux et du noyau de fer. Crédit : NASA, ESA, and A. Feild (STScI).

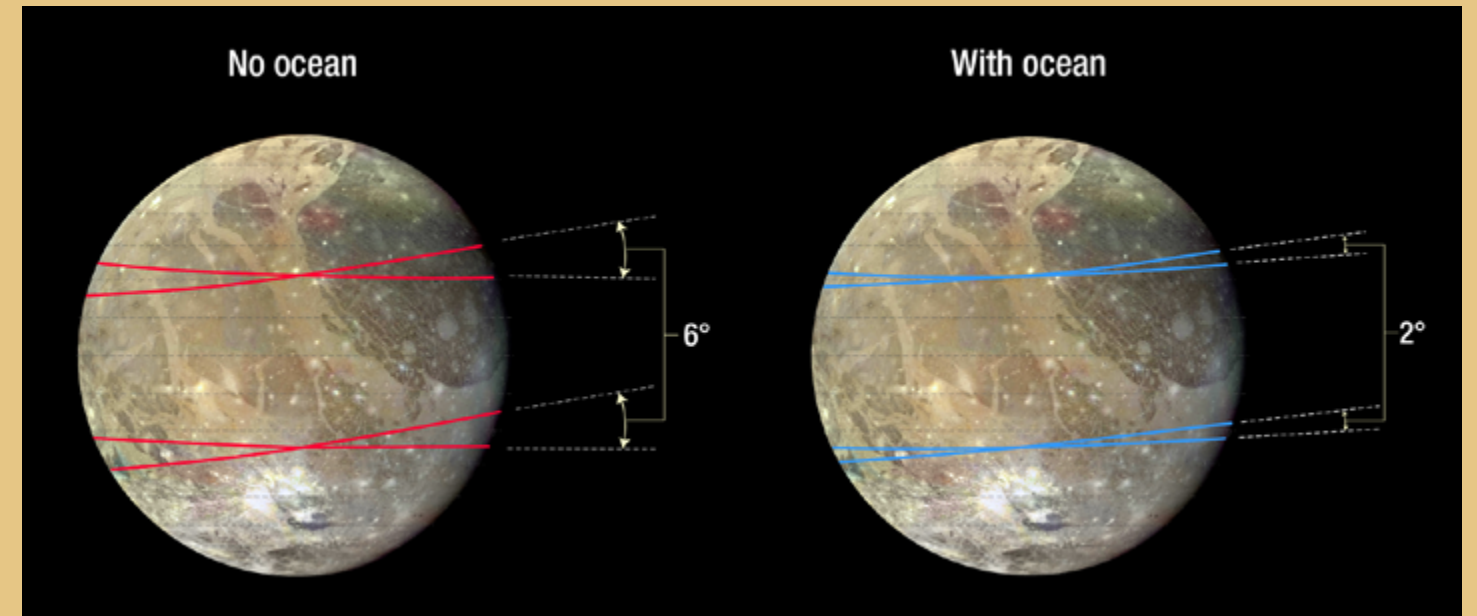


de traceurs divers, comme la limaille de fer, des particules chargées, des formes particulières de rayonnement, etc. C'est par le comportement des traceurs qu'il est possible de déterminer les

propriétés des champs magnétiques et des structures et mécanismes qui les génèrent. Puisque les aurores sont régies par l'interaction entre les particules chargées et le champ magnétique, en observant

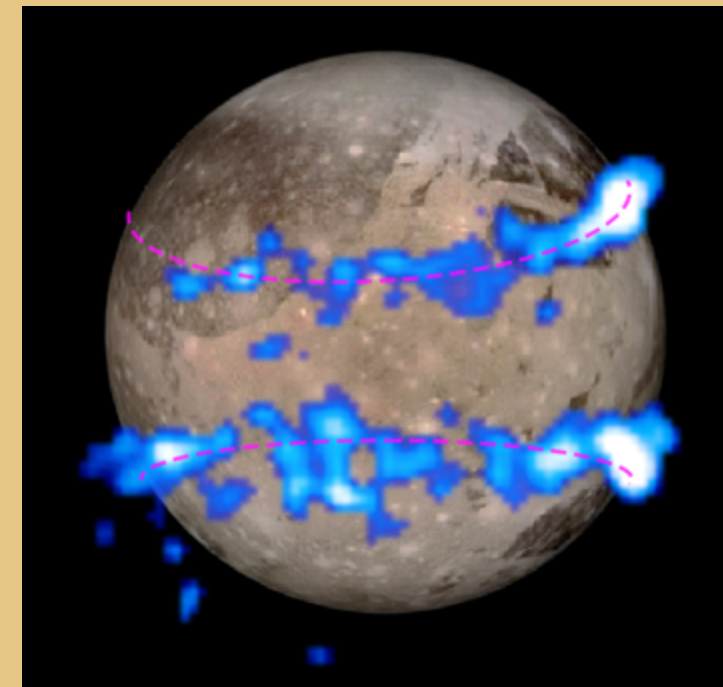
les premières grâce à des techniques appropriées, il est possible de déduire la forme du second et d'obtenir des informations sur la structure interne du corps planétaire qui le génère. Pour produire des aurores, les particules chargées (principalement des électrons et des protons d'origine solaire) capturées par les lignes de force du champ magnétique doivent cependant agir sur le gaz de l'atmosphère ; il se trouve que Ganymède a une atmosphère très ténue d'oxygène, l'élément chimique le plus apte à produire des lueurs d'aurores.

En s'attendant à pouvoir mieux comprendre ce phénomène dans l'ultraviolet (un rayonnement principalement absorbé par l'atmosphère terrestre), Saur et certains de ses collègues ont décidé de lancer leur propre programme d'observation en utilisant le Télescope spatial Hubble (capable d'enregistrer la lumière ultraviolette de longueur d'onde jusqu'à 200 nanomètres, correspondant aux rayons UVC) et de pointer l'instrument vers Ganymède, éventuellement en coincidence avec les pointes de force du vent



solaire, afin de maximiser leurs chances d'observer l'apparition des aurores. Ce faisant, l'équipe de Saur a pu suivre la dynamique des aurores de Ganymède pour une période suffisamment longue pour établir que leur migration en latitude ne couvre que 2°. Selon les modèles de la structure interne de la grande lune, cette valeur corrobore l'existence d'un océan global d'eau salée, caché à environ 150 km sous la surface et ayant environ 100 km de profondeur, donc autour de

dix fois plus profond que les plus profondes fosses abyssales de la Terre. Les chercheurs ont estimé que cet océan contient plus d'eau que tous nos océans réunis, et du point de vue astrobiologique, ceci fait de Ganymède un objet extrêmement intéressant. En fait, on ne peut exclure a priori que, dans ce gigantesque réservoir d'eau, puisse se trouver une forme de vie primitive comparable à celle observée dans nos abysses et capables de proliférer en tirant



son énergie de possibles sources hydrothermales ; un scénario qui pourrait se répéter sur une autre des grandes lunes joviennes, Europa, qui serait aussi caractérisée par un océan souterrain global de grande profondeur.

Illustration des changements de latitude des ovales auroraux de Ganymède : à gauche, en l'absence d'un océan, et à droite, si l'océan existe et a les caractéristiques expliquées dans l'article. Crédit : NASA, ESA, and A. Feild (STScI).

Ganymède devrait donc être ajoutée au groupe déjà grand d'objets de tailles et de natures différentes sur lesquels la présence de l'eau a été constatée. Que ce soit à l'état gazeux, liquide ou solide, il semblerait que l'on puisse trouver de l'eau partout dans notre système solaire.

Avec la même technique utilisée par Saur, mais appliquée aux télescopes les plus puissants de l'avenir proche, il pourrait être possible de découvrir des océans aussi sur les planètes et les grandes lunes en orbite autour d'autres étoiles ; une occasion exceptionnellement fascinante que même les esprits les plus fervents et imaginatifs n'auraient jamais pu imaginer !

Images des aurores de Ganymède prises par Hubble dans l'ultraviolet, et superposées, à leur position réelle, sur une image en lumière blanche de la grande lune joviennne prise par la sonde Galileo. Crédit : NASA, ESA, et J. Saur (Université de Cologne, Allemagne).

# Nova 1670 : un mystère presque résolu

*345 ans après l'apparition d'une nova dans le Cygne, une petite équipe d'astronomes a déterminé que cet événement a été probablement causé par la fusion explosive de deux étoiles normales. Les caractéristiques chimiques et physiques du résidu laissé par l'évènement sont tout à fait adaptées à un type d'explosion à mi-chemin entre celles des novas classiques et celles des supernovas.*

Le télescope APEX (Atacama Pathfinder Experiment) de 12 mètres de diamètre pour les ondes submillimétriques, sur le plateau de Chajnantor, au Chili, a été utilisé par une équipe de chercheurs pour enquêter sur les restes de la nova Vul 1670. Crédit : ESO.

Dans la soirée du 20 juin 1670, à Dijon, en France, l'attention de Anthelme Voituret, un moine chartreux astronome et souvent appelé don, est attirée par une nouvelle étoile de troisième magnitude apparue de nulle part juste au-dessus de la tête du Cygne (près d'Albiréo), juste dans les limites de la constellation actuelle du Petit Renard (Vulpecula), dessinée vers la même époque par le grand cartographe céleste Johannes Hevelius. Environ un mois après Anthelme, en observant depuis Gdańsk, Hevelius a également noté la nouvelle étoile

et l'a enregistrée dans ses tableaux. L'évènement était clairement remarquable malgré le fait que, dans les soixante-dix années précédentes, il y avait déjà eu deux spectacles similaires stellaires ; un à courte distance angulaire, appelé Nova Cygni 1600 (mag. 3), et l'autre dans la constellation du Serpente (Ophiuchus), la Supernova 1604 (mag. -2,5).

Tant Anthelme qu'Hevelius ont pu admirer cette nouvelle étoile de 1670 jusqu'au mois d'octobre, lorsque sa luminosité a diminué sous le seuil de visibilité à l'œil

Collaboration spéciale  
de Michele Ferrara,  
Free Astronomy Magazine



Carte céleste réalisée par Hevelius et publiée dans la revue scientifique *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, avec un cercle autour de l'endroit où Nova Vul 1670 est apparue. Crédit : Royal Society.

nu et aux télescopes rudimentaires de l'époque. Étonnamment, le 17 mars 1671, Anthelme se rend compte, une fois de plus avant tout le monde, que l'étoile apparaît à nouveau, au point que le 30 avril, elle atteignit la magnitude de 2,6, soit environ deux fois plus lumineuse que l'année précédente. Hevelius ne note ce retour inattendu qu'à la fin du printemps,

quand l'étoile est aussi observée par Giovanni Domenico Cassini, qui a été nommé la même année directeur de l'Observatoire de Paris nouvellement fondé.

Vers la fin d'août, l'étoile disparaît à nouveau, pour réapparaître ensuite une dernière fois en mars 1672, quand elle est redécouverte par Hevelius, qui put l'observer

jusqu'au 22 mai, après quoi l'étoile est devenue plus faible que la magnitude 6 (limite moyenne de l'œil nu). Dans cette troisième apparition, l'étoile ne devint jamais plus brillante que la magnitude 5,5, et passa donc inaperçue de la plupart des observateurs.

Outre sa position dans le ciel et sa luminosité apparente, les différents

témoins de ce triple événement n'ont pas les moyens de fournir des informations supplémentaires pour la postérité, sauf pour quelques références controversées à une couleur rougeâtre de la nouvelle étoile pendant les périodes de faible luminosité.

Au cours des siècles, l'apparition de cette étoile est devenue un lointain souvenir, aussi parce que personne n'a, jusqu'à assez récemment, été en mesure de relier Nova Vul 1670 aux restes éventuels de

phénomènes cataclysmiques, et ce, malgré le fait que déjà à partir de la première moitié du 20<sup>e</sup> siècle, les astronomes savaient que certaines novas et supernovas historiques ont laissé des traces sous forme de nébulosité. Toute tentative de découvrir quelque chose à l'emplacement de Nova Vul 1670 s'est avérée infructueuse, y compris une recherche menée en 1938 par Milton L. Humason sur des plaques photographiques du Palomar Observatory Sky Survey.

Une première percée a lieu au début des années 80 : des études menées surtout en H $\alpha$  (lumière rouge) par Michael M. Shara, Anthony F.J. Moffat et Ronald F. Webbink avec le Télescope à Miroir Multiple (MMT<sup>[1]</sup>), au Cerro Tololo International Observatory, et au télescope Canada-France-Hawaii ont révélé, à l'emplacement de Nova Vul 1670, un anneau gazeux avec certaines sous-condensations et jets possibles de matière

<sup>1</sup> Converti en 1998 en télescope à miroir unique de 6,5 m.



Cette vue à grand champ montre le ciel qui entoure l'emplacement de Nova Vul 1670. Les restes de la nova historique apparaissent, faiblement lumineux, au centre de l'image. Crédit : ESO/Digitized Sky Survey 2. Remerciements : Davide De Martin

perpendiculaires à l'anneau, peut-être alignés avec les pôles de ce qui semblait être une étoile centrale enveloppée d'un cocon gazeux, empêchant les chercheurs de déterminer la nature réelle de l'étoile. L'équipe a calculé la distance de cet objet à environ 1800 années-lumière, et dérivé une magnitude absolue de 10,4, ce qui représente environ six magnitudes (ou 244 fois) plus faible qu'une vieille nova typique. Considérant également que la différence entre la

apparente maximale et minimale de la nova au fil des siècles a atteint 18 magnitudes, Shara et ses collègues ont fondamentalement confirmé l'anomalie représentée par cet événement, mais — sans exclure des scénarios différents comme celui d'une nova classique — ils ont essentiellement soutenu la seconde interprétation, ce qui suggère qu'il y avait à la base de tout cela un système binaire avec transfert de

matière. Quelques décennies ont passé — qui ont vu l'objet être rebaptisé CK Vul (la combinaison de deux lettres suivies de l'abréviation de la constellation est l'un des moyens utilisés par les astronomes pour cataloguer les étoiles variables) — sans autres études pertinentes, laissant planer le doute sur ce qui s'est vraiment passé dans ce coin de ciel il y a plus de trois siècles. Peut-être était-ce l'explosion d'une « nova lente » (comme Nova

Aquiliae 1919), culminant avec son explosion à la suite d'une flash final de son enveloppe d'hélium, ou peut-être un événement violent pas encore totalement connu ou complètement inconnu. La seule chose sûre est sa dynamique explosive, étant donné que du matériel a été observé s'éloignant du centre de l'objet stellaire à une vitesse de quelques centaines de kilomètres par seconde.

De plus, il est tout aussi certain que le reste de cette explosion n'a pas été repéré avant en raison de la température très basse de ce matériau,

estimée à environ  $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ , qui décale l'émission du maximum de lumière (si on peut l'appeler ainsi) vers les longueurs d'ondes millimétriques et au-delà, dans le domaine radio. Certaines des technologies les mieux adaptées à étudier ces régions du spectre électromagnétique n'ont réalisé des progrès importants qu'au cours des dernières années, et les premiers à les utiliser efficacement sur CK Vul furent six chercheurs dirigés par Tomasz Kamiński (Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Allemagne), qui a pointé sur l'étoile énigmatique l'antenne monoparabole APEX (Atacama Pathfinder Experiment, le prédécesseur d'ALMA) de l'ESO; les huit antennes du Submillimeter Array (SMA), situées à Hawaï et exploitées par le Smithsonian Astrophysical

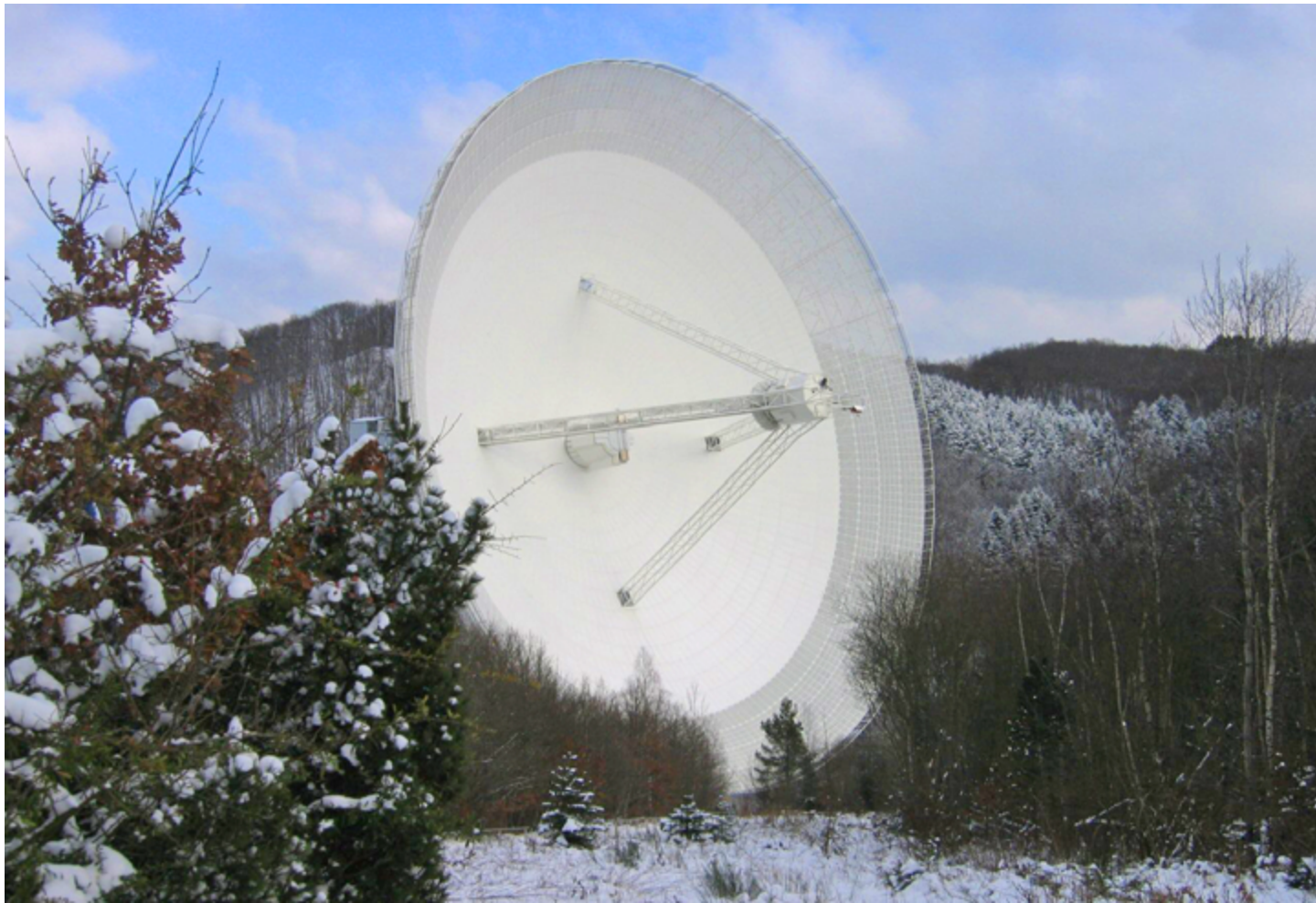
Observatory; et l'immense radiotélescope d'Effelsberg, en Rhénanie du Nord-Westphalie (Allemagne).

L'observation à ondes millimétriques a révélé de manière surprenante que le gaz moléculaire et la poussière en expansion associés à CK Vul sont particulièrement variés d'un point de vue chimique.

Cet environnement est exceptionnellement riche en azote et caractérisé par des ratios isotopiques très particuliers, notamment en ce qui concerne le carbone, l'oxygène et l'azote. La composition et l'abondance des différents isotopes chimiques observés semblent incompatibles soit avec un scénario typique nova, ou avec une nova lente, ou même avec d'autres procédés explosifs connus,



Les huit antennes de 6 mètres qui constituent le Submillimeter Array (SMA), situé sur le volcan Mauna Kea, à Hawaï. L'équipe de Tomasz Kamiński a aussi utilisé cet instrument pour étudier la composition chimique et le mouvement de la matière éjectée par l'explosion de Nova Vul 1670. Crédit : Afshin Darian, via Flickr et Wikimedia Commons.

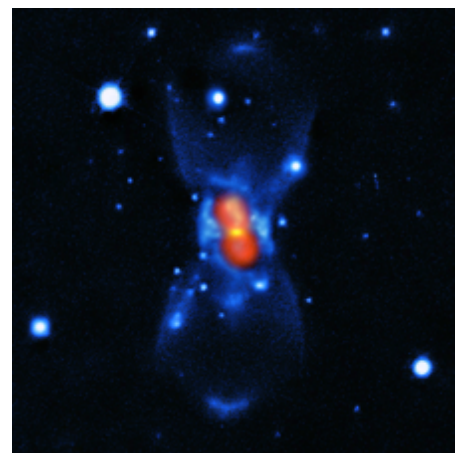


Scène hivernale pittoresque du radiotélescope de 100 mètres de diamètre d'Effelsberg en Allemagne, utilisé par Kamiński et ses collègues pour observer le résidu de Nova Vul 1670 au-delà du domaine submillimétrique. Crédit : Max-Planck-Institut für Radioastronomie.

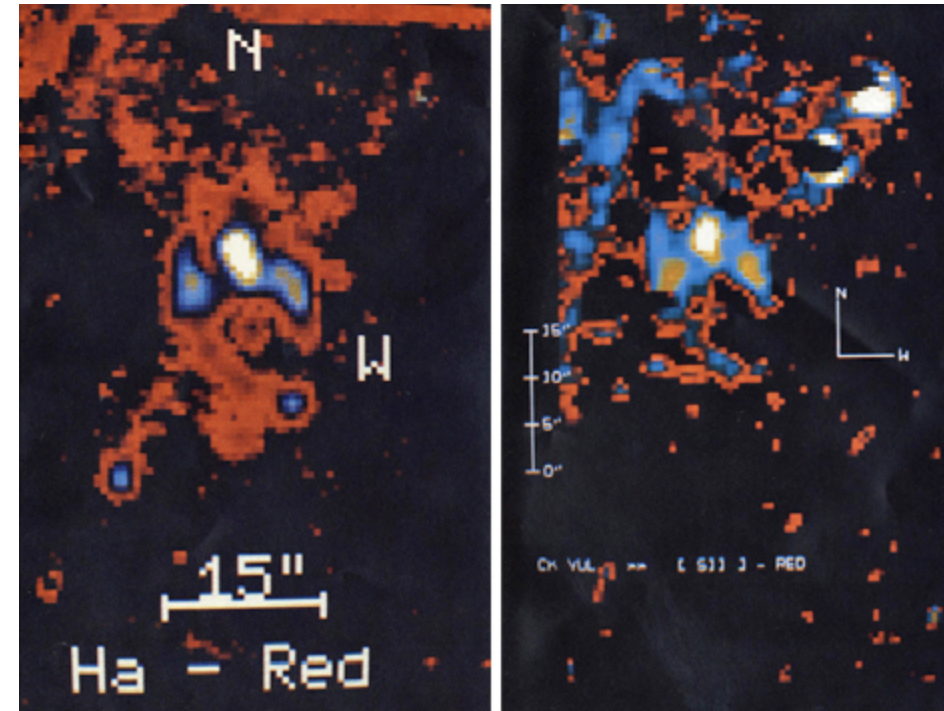
y compris la formation d'une nébuleuse planétaire — qui, bien qu'elles peuvent dans certains cas ressembler au résidu de CK Vul, en raison de leur forme en sablier, montrent, contrairement à celui-ci, une abondance marquée de l'oxygène et une présence moins prononcée de l'azote. Aussi la masse de la matière qui compose le résidu en expansion (au moins 1,2 masse solaire) est excessive par rapport à celle généralement accumulée autour d'elle par une nova, et la trop faible luminosité du même vestige est incompatible avec la moyenne des restes connus de novas. Une autre différence par rapport à d'autres résidus de novas est la forte émission moléculaire aux ondes submillimétriques de CK Vul,

absente dans 17 autres restes de novas observés pour comparaison avec APEX par l'équipe de Kamiński. Selon les chercheurs, un tel scénario atypique pourrait être le produit final d'une nova rouge lumineuse (*Luminous Red Nova* en anglais, abréviation LRN), un phénomène plutôt rare, dont l'existence-même est encore l'objet de débats au sein de communauté astronomique, dans lequel deux étoiles de la séquence principale (des étoiles normales comme le Soleil, mais pas nécessairement de la même taille) entrent en collision et fusionnent, créant une explosion très puissante, mais pas entièrement destructrice. En pratique, c'est quelque chose qui se trouverait à mi-chemin entre les supernovas,

scénario dans lequel les étoiles concernées ne survivent pas, et



Le résidu de la nova. Cette image combine le rayonnement visible du gaz (en bleu, télescope Gemini); celui, submillimétrique, de la poussière (en jaune, SMA); et l'émission moléculaire (en rouge, APEX et SMA). Crédit : ESO / T. Kamiński.



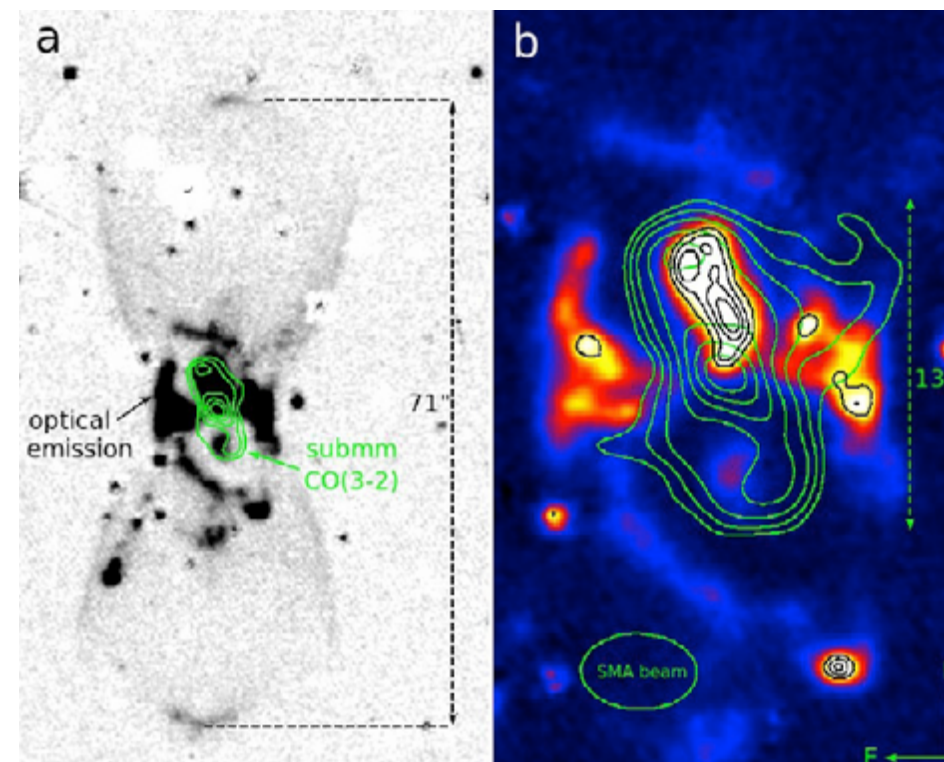
Les images en fausses couleurs publiés en juillet 1985 dans *The Astrophysical Journal*, dans le cadre d'un article confirmant la découverte du résidu de Nova Vul 1670. La source stellaire variable à l'intérieur a été nommée CK Vul. Crédit : Shara, Moffat, Webbink.

les novas, où seules les couches de surface explosent, sans déstabiliser profondément la structure stellaire.

Quant aux novas rouges lumineuses ou « transitoires rouges », nous savons essentiellement que, après

l'explosion — qui affecte également les couches profondes des deux étoiles, et donc la richesse de la composition chimique du résidu —, il se produit une expansion très rapide de la matière, qui finit par occuper un volume dont le rayon est des milliers ou des dizaines de milliers de fois plus grand que celui du Soleil. Cette expansion abaisse rapidement la température de la bulle de gaz et de poussières, poussant la lumière émise vers une plus grande longueur d'onde et faisant donc en sorte que le résidu de la nova prend une teinte rouge, d'où le nom de cette classe d'objets.

Que CK Vul puisse effectivement avoir été un LRN est corroboré par un transitoire rouge maintenant confirmé, OGLE-2002-BLG-360, observé à plusieurs reprises entre 2002 et 2006, dont la courbe de lumière était essentiellement une version réduite de celle de Nova Vul 1670. Plus généralement, Kamiński et ses collègues soulignent, dans un article publié dans *Nature* le 23 mars 2015 (dans lequel ils présentent les résultats de leurs observations), que la plupart des caractéristiques de CK Vul sont conformes au modèle de nova rouge lumineuse et que par conséquent, cet objet pourrait être considéré comme l'archétype de cette catégorie d'étoiles. Il reste à comprendre le type d'étoile qui niche au centre du résidu, mais répondre à cette question ne sera pas une tâche facile, tant à cause de sa faible luminosité que parce qu'il est encore entouré et donc obscurci par la matière traitée dans les réactions thermonucléaires et diffusée par la fusion explosive.



Images publiées dans *Nature* près de 30 ans après les images du haut de la page, par Kamiński et ses collègues : a) le résidu nébuleux entier en Ha et en [N II], avec l'émission moléculaire nouvellement découverte avec le SMA indiquée en vert; b) gros plan de la région centrale. Crédit : Kamiński et collègues, revue *Nature*.

Voir <http://adsabs.harvard.edu/abs/1982ApJ...258L..41S> et <http://adsabs.harvard.edu/abs/1985ApJ...294..271S> • Nous vous suggérons aussi cette vidéo : <http://www.eso.org/public/france/videos/eso1511a/>

# J'aimerais savoir...

## ...le ciel et l'espace



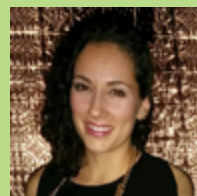
*D'où viennent les étoiles que l'on voit dans ciel, et comment les classifie-t-on ?*

L'amas double de la constellation de Persée. Image prise à Vaudreuil (Québec) le 12 décembre 2011, par Yves Tremblay.

avec Gilbert St-Onge



et Geneviève Dufresne



Tous, nous avons pu regarder les étoiles, soit sous le ciel pollué d'une ville ou, pour les plus chanceux, sous le ciel bien noir à la campagne. On peut remarquer qu'elles ne sont pas distribuées uniformément sur le ciel ; certaines régions du ciel sont peuplées d'étoiles, tandis que d'autres sont plutôt pauvres. On remarque aussi que les étoiles n'ont pas toutes la même luminosité ; certaines sont très pâles, à peine perceptibles, et d'autres très intenses. Parfois, on arrive même à distinguer un peu de couleur...

Les civilisations de l'Antiquité ont créé des figures sur le ciel étoilé ; il s'agit des *constellations*. Les constellations représentent assez souvent des figures associées aux mythologies de ces civilisations lointaines, pour qui les étoiles jouaient déjà un rôle culturel et religieux de premier plan. Encore aujourd'hui, on utilise ces figures que sont les constellations pour représenter la voûte étoilée ; prenons comme exemple le chasseur, Orion, qui domine nos hivers nordiques, ou la constellation du Sagittaire, où se trouve le cœur de la Voie lactée et que l'on peut observer tout l'été en direction sud.

Mais d'où viennent ces étoiles ?

L'âge de l'Univers est estimé à un peu moins de 14 milliards d'années. Au début, il y aurait eu le Big Bang : l'Univers apparaît spontanément de nulle part. Il était à l'origine si dense que les photons y étaient prisonniers. L'Univers consistait en grande majorité de particules élémentaires tels des protons, des électrons et des neutrinos ; c'était un univers sombre. Les électrons et les photons (la lumière) étaient sans cesse en collision, ceux-ci (les

La Voie lactée par Yves Tremblay, le 23 juin 2014  
au lac Simon près de Duhamel (Québec).  
<http://myastrophoto.com/ciel.html#Cygne270914>

photons) étant prisonniers d'un Univers trop dense pour circuler librement. L'expansion de l'Univers a permis d'en diminuer la densité et la température, ce qui a permis de former des combinaisons entre protons et électrons — des atomes neutres —, permettant éventuellement aux photons de se libérer et de circuler sans encombre. Les premières informations sous forme de rayonnement qui sont observées sont le rayonnement diffus cosmologique (*Cosmic Microwave Background* en anglais, ou CMB), émis à l'époque où l'Univers était très dense et très chaud; il n'avait qu'environ 380 000 années d'existence...

Les premières étoiles apparaissent plus tard, soit environ 400 millions d'années après le Big Bang. Les résultats obtenus par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) à l'aide du satellite Planck<sup>[1]</sup> semblent indiquer que les premières étoiles seraient apparues un peu plus tard, vers 550 millions d'années après le Big Bang, soit plus de 100 millions d'années plus tard que les estimations précédentes. Le satellite Planck a étudié et cartographié le CMB; il a établi des relevés des variations de la polarisation de cette lumière fossile.

Les premières étoiles étaient probablement très massives et constituées principalement d'éléments légers, soit l'hydrogène et l'hélium — peut-être aussi d'un peu de lithium —, ces éléments ayant été créés lors du Big Bang. Les éléments plus évolués (plus lourds) ont plutôt été formés dans les étoiles. Ces premières étoiles,

dites de population III, n'ont jamais été observées directement jusqu'à maintenant, puisqu'elles avaient des durées de vie très courtes de seulement quelques millions d'années, à cause de leur masse extrême pouvant possiblement atteindre des centaines, voire même un millier de masses solaires — leur luminosité devait être tout aussi spectaculaire! On présume que ces étoiles ont existé, et qu'elles ont contribué à la réionisation<sup>[2]</sup> de l'Univers par leur rayonnement intense et aussi par leur fin tragique en explosant en hypernova<sup>[3]</sup>, enrichissant ainsi l'Univers de matériaux plus lourds et plus complexes (que l'on nomme « métaux » en langage astrophysique). Il est possible entre autres d'expliquer la présence d'éléments lourds dans le spectre de certains quasars<sup>[4]</sup> par l'existence de ces étoiles. Les quasars sont des sources de rayonnement quasi-stellaire souvent très âgées, et s'étant formées alors que l'Univers était jeune, probablement un peu après les hypothétiques étoiles de population III.

Les étoiles qui ont suivi sont celles de population II; il s'agit d'étoiles formées à partir des matériaux enrichis (d'éléments un peu plus lourds) laissés par la génération préalable d'étoiles de population III. Certaines sont encore observables aujourd'hui dans le halo de notre Galaxie. En 1944, Walter Baade déduit qu'il y a deux populations d'étoiles dans notre Galaxie: une dont les lignes spectrales sont très fines, ce qui signifie qu'elles ont une faible abondance d'éléments chimiques à leur surface — ce sont

les étoiles de population II. Celles-ci peuvent s'observer dans le halo galactique, là où les gaz nécessaires à la formation d'étoiles sont pratiquement absents; il y a donc peu de chance d'y observer des étoiles jeunes.

L'autre groupe d'étoiles ont des lignes spectrales plus abondantes: il s'agit des étoiles de population I, que nous connaissons aujourd'hui. Celles-ci s'observent partout, particulièrement dans le disque galactique; elles occupent toutes les régions du disque. Il s'agit d'étoiles dont l'âge peut varier entre 0 et 10 milliards d'années environ; ce sont des étoiles enrichies d'éléments chimiques à leur surface et riches en éléments plus lourds que l'hélium, qui proviennent des résidus de supernovas qui ont distribué ces matériaux dans l'espace interstellaire environnant.

On doit aussi tenir compte des mouvements dans la Galaxie; celle-ci a une rotation différentielle<sup>[5]</sup>, les étoiles du centre se déplaçant plus vite que celles du pourtour. Au niveau du Soleil, on estime la période de rotation autour du centre de la Galaxie à environ 225 millions d'années. En plus de ce mouvement des étoiles, il y a celui du corps gazeux du disque de la Galaxie, qui permet sur de très longues périodes d'entremêler les éléments enrichis (lourds) et les matériaux d'origine de la formation des étoiles du disque galactique. On peut probablement projeter cette modélisation aux autres galaxies de l'Univers. Notez que le Soleil — qui est notre étoile du système solaire, celle qui produit l'énergie nécessaire à la vie sur Terre — est une étoile

de cette catégorie (population I), et est enrichie d'éléments lourds. Nous-mêmes, humains, sommes faits de ces éléments évolués; nous sommes donc de la matière provenant des étoiles de population évoluée ou, comme disait Hubert Reeves, « nous sommes de la poussière d'étoiles ».

### La naissance des étoiles.

Dans le plan du disque de la Galaxie, on observe aux longueurs d'ondes visuelles de grandes nébuleuses comme celle de la constellation d'Orion, Messier 42. Ces nébuleuses actives (nébuleuses à émission) sont souvent des régions de formation d'étoiles associées à de grands nuages moléculaires qui couvrent de grandes régions du ciel et qui contiennent parfois plusieurs régions

très actives où se forment les étoiles. Messier 42 est l'un des meilleurs exemples de régions de formation d'étoiles — et très certainement de planètes — au sein des disques protoplanétaires (appelés *proplyds* de l'anglais « *protoplanetary disks* », francisé en *proplydes*) que l'on y observe.

Cette grande nébuleuse est l'une des plus spectaculaires du ciel étoilé; on peut y observer un grand nombre de détails, même avec des instruments d'amateurs. À l'aide de simples jumelles, on en distingue la forme générale; les plus gros instruments nous révèlent même des couleurs subtiles, qui génèrent un sentiment de profondeur et des effets de dimensions inégalées. Cette sublime nébuleuse nous

révèle plusieurs objets stellaires en formation; un grand nombre de disques protoplanétaires y ont été observés à l'aide du Télescope spatial Hubble<sup>[6]</sup>.

En équipe avec Alain Roussel, j'ai suivi pendant quelques années la nébuleuse M42; nous avons pu mettre en évidence plusieurs étoiles variables et quelques proplydes, même avec des instruments d'amateurs<sup>[7]</sup>.

On sait aujourd'hui que les étoiles naissent dans de grands nuages moléculaires, qui se déplacent dans des galaxies comme la nôtre. Ils peuvent être perturbés par plusieurs facteurs, dont le passage d'une étoile ou l'explosion d'une supernova à proximité, ou simplement par les matériaux rencontrés sur leur trajectoire à travers la Galaxie.

Ces conditions peuvent influencer ces nuages au point qu'ils deviennent instables et que, par endroits, ils s'effondrent sous l'effet de la gravité; on parle alors d'*effondrement gravitationnel*. Ce processus fait en sorte que la masse de matériaux (gaz et poussières) du nuage est comprise dans un volume de plus en plus petit de cette section de la nébuleuse, ce qui fait que la densité augmente. Si les conditions sont réunies, la densité sera assez grande pour que la température s'élève suffisamment pour former une étoile. Celle-ci peut aussi être associée à un disque protoplanétaire, dans lequel des planètes peuvent se former...



La grande nébuleuse de la constellation d'Orion par le Télescope spatial Hubble et le télescope de 2,2 m de l'European Southern Observatory à La Silla (Chili).  
Crédit photo : NASA, ESA, M. Robberto (STScI/ESA) et collaborateurs.

1 Présentés sur le Web le 5 février 2015; voir [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Planck/Planck\\_reveals\\_first\\_stars\\_were\\_born\\_late](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck/Planck_reveals_first_stars_were_born_late)

2 Voir <http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9ionisation>

3 Voir <http://fr.wikipedia.org/wiki/Hypernova>

4 Voir <http://fr.wikipedia.org/wiki/Quasar>

5 Voir [http://fr.wikipedia.org/wiki/Voie\\_lact%C3%A9e#Rotation\\_galactique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Voie_lact%C3%A9e#Rotation_galactique)

6 Voir « Born in beauty: proplyds in the Orion Nebula » au <http://www.spacetelescope.org/news/heic0917/>

7 Nos documents à ce sujet sont sur le Web; le plus récent est au [http://www.astrosurf.com/stog/xtravaux\\_recherches\\_2/m42\\_2012/m42rs\\_2012.pdf](http://www.astrosurf.com/stog/xtravaux_recherches_2/m42_2012/m42rs_2012.pdf)



Une image de Messier 42, sur laquelle a été surimposée la position de quelques disques protoplanétaires (des systèmes composés d'une étoile et de planètes en formation). Du haut au bas, ces propydes portent les désignations cryptiques 132-1832, 206-446, 180-331, 106-417, 231-838 et 181-825.

Crédit photo : NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA), the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team et L. Ricci (ESO).

Comme on le voit dans la nébuleuse d'Orion (Messier 42), il peut y avoir un grand nombre d'objets stellaires jeunes en formation simultanément dans une seule grande nébuleuse.

On observe aussi, dans d'autres nébuleuses, de grandes colonnes de gaz et de poussières desquelles se forment des étoiles; un bel exemple est Messier 16 et ses « Piliers de la Création » de l'image ci-contre dans laquelle on voit principalement, tout au bout des colonnes (en haut), l'évaporation de matériaux vers l'extérieur des dites colonnes sous l'influence de vents importants créés par les étoiles en formation dans ces régions.



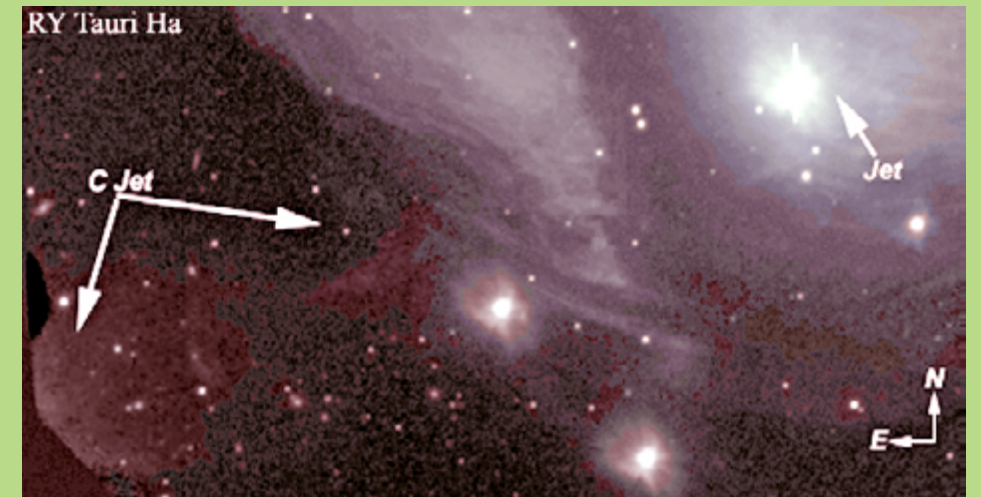
Les « Piliers de la Création » (*Pillars of Creation* en anglais) dans la nébuleuse Messier 16, par le Télescope spatial Hubble. Crédit photo : NASA, ESA, et Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

## Les nébuleuses associées aux étoiles jeunes

Les étoiles évoluent de telle sorte que toute jeune, une nébuleuse peut être formée au début du processus. Celle-ci peut avoir la forme de lobes, qui peuvent être bipolaires. Comme exemples, deux nébuleuses dont la forme est un lobe et qui me sont familières, soit NGC 2261 qui est associée à l'étoile jeune R Monoceros<sup>[8]</sup>, ou encore la nébuleuse associée à l'étoile jeune RY du Taureau<sup>[9]</sup>. Ces nébuleuses recouvrent leur étoile et s'ouvrent sur le ciel en s'éloignant de l'étoile. Certaines étoiles ont aussi des jets de matériaux (on peut parfois distinguer un jet atomique et un jet d'ions), qui s'échappent de leur environnement à des vitesses pouvant être supersoniques; c'est le cas pour ces deux étoiles jeunes.

Les étoiles qui ont des masses trop importantes ne sont jamais stables; elles évoluent très rapidement en évacuant leurs couches externes dans l'espace circumstellaire, puis elles deviennent des supernovas, et éventuellement des étoiles à neutrons ou même, pour certaines, des trous noirs — peu d'étoiles sont de cette catégorie extrême.

La grande majorité des étoiles sont de faible masse ou de masse intermédiaire. Celles-ci atteignent une stabilité à leur maturité (sur la séquence principale<sup>[10]</sup>). La vie stable des étoiles matures est



**RY Tauri.** On peut voir sur cette image la grande structure du contre-jet, au sud-est de l'étoile, et quelques nœuds du jet tout près de l'étoile, au nord-ouest. Cette image est de l'auteur en collaboration avec Pierre Bastien, et a été prise en 2005 par le télescope Gemini Nord situé à Hawaï<sup>[9]</sup>; il s'agit de l'image de la découverte de ce jet.

directement dépendante de leur masse : plus l'étoile a une masse importante, moins elle passe de temps au stade d'équilibre (seulement quelques millions d'années), et elle vieillit rapidement. Au contraire, moins l'étoile a une masse importante, plus elle passe de temps à l'état stable (des milliards d'années), et elle vieillit lentement. Comme exemple, citons le Soleil : sa masse est plutôt faible pour une étoile, sa vie stable pourrait atteindre les 10 milliards d'années (10<sup>9</sup> années); après l'étape de stabilité, il deviendra une géante rouge, puis une nébuleuse planétaire avec une étoile naine blanche à l'intérieur.

## Discussion

On trouve principalement les étoiles dans les galaxies; elles peuvent être associées en amas galactiques

comme des amas d'étoiles jeunes, ou en amas globulaires (étoiles plus âgées) — ces dernières se trouvent plutôt dans le halo des galaxies. Enfin, certaines peuvent être plutôt solitaires, un peu comme le Soleil.

Le principal système de classification des étoiles est une série de lettres :



**NGC 2261 et son jet HH-39.** On peut voir quelques nœuds du jet HH-39 (indiqués par des flèches). L'image fut prise par Denis Bergeron avec un télescope Meade RCX de 305 mm (12"), d'une distance focale de 2712 mm (106,77"), soit f/8,8. Les images ont été prises en « bin 2 » avec sa caméra CCD, une ST-10 XME de Santa Barbara Instrument Group (SBIG).

- 8 ST-ONGE, Gilbert. « À la portée de tous : NGC 2261 et HH-39 par des amateurs québécois ». *Astronomie-Québec* vol. 3, n° 2 (juillet/aout 2014), p. 32-37 · <http://astronomie.quebec/>
- 9 ST-ONGE, Gilbert, Pierre BASTIEN et Lorraine MORIN. « Le projet RY Tauri au télescope GEMINI-N ». *Les Saisons du ciel* · [http://www.astrosurf.com/stog/xtravaux\\_recherches\\_2/rytau\\_gem2/rytau2.htm](http://www.astrosurf.com/stog/xtravaux_recherches_2/rytau_gem2/rytau2.htm)
- 10 Voir [http://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9quence\\_principale](http://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9quence_principale)



L'amas double de Persée (NGC 869 et NGC 884; parfois appelés  $\eta$  et  $\chi$  Per, à tort<sup>[1]</sup>). Cette image a été réalisée par Yves Tremblay à Vaudreuil (Québec) le 12 décembre 2011. Lunette SV80ED de 80 mm *f*/7 sur monture EQ6, guidage avec QHY5 sur chercheur 9x 50 mm aux 5 secondes. Caméra QHY9 monochrome avec filtres Baader R, G et B. Capture de 7 x 180 s en bin1 en RGB (2"/pixel). Logiciel Maxim DL utilisé pour la capture et le guidage, la calibration, la pile, le DDP et la déconvolution; Photoshop CS5 pour le « stretching », le « sharpening », le « gradient removal », la réduction de bruit et d'autres ajustements.

[http://myastrophoto.com/\\_ds\\_objects/ngc869.htm](http://myastrophoto.com/_ds_objects/ngc869.htm)

1 Voir O'MEARA, Stephen J. et Daniel W.E. GREEN. « The Mystery of the Double Cluster ». *Sky & Telescope*, vol. 105, n° 2 (février 2003), p. 116-119.

dans l'ordre, ce sont O, B, A, F, G, K, et M. Ces lettres indiquent le type spectral de l'étoile, qui correspond à un indice de couleur. Les étoiles les plus massives, celles de type O ou B, sont violettes/bleues; on passe ensuite au blanc légèrement bleuté pour le type A; et ainsi de suite jusqu'à l'autre bout, où les étoiles de type M sont très rouges.

Les étoiles montrent peu de changement dans le temps d'une vie humaine, mais la luminosité de certaines est variable: ce sont des étoiles dites variables. Parfois, on peut observer une « nouvelle » étoile: il s'agit alors d'une nova ou d'une supernova, qui apparaît dans le ciel pour une période de temps donnée.

### Références additionnelles

- Wikipédia. *Étoile de population III*. [http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89toile\\_de\\_population\\_III](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89toile_de_population_III)
- Le Point. *Découverte d'une étoile presque aussi vieille que l'univers*. [http://www.lepoint.fr/astronomie/decouverte-d-une-etoile-presque-aussi-vieille-que-l-univers-10-02-2014-1790299\\_1925.php](http://www.lepoint.fr/astronomie/decouverte-d-une-etoile-presque-aussi-vieille-que-l-univers-10-02-2014-1790299_1925.php)
- ROUSSEL, Alain et Gilbert ST-ONGE, La suite de l'étude de la région de M42. [http://www.astrosurf.com/stog/xtravaux\\_recherches\\_2/m42\\_2012/m42rs\\_2012.pdf](http://www.astrosurf.com/stog/xtravaux_recherches_2/m42_2012/m42rs_2012.pdf)
- Astronomie et Astrophysique.

*L'âge de l'Univers par ses constituants*. <http://www.astronomes.com/lunivers/age-univers/>

### Le commentaire de Geneviève Dufresne

Il est vraiment intéressant de se rendre compte comment les étoiles naissent, et qu'elles ont aussi façonné l'histoire du monde. Quand on pense aux différents symboles des constellations, et que toutes les générations avant nous les ont aussi contemplées, ça donne la berlue!

Les 88 constellations que nous connaissons aujourd'hui ont été définies par l'Union astronomique internationale en 1930. Elles sont cependant pour la plupart directement inspirées des constellations grecques telles que les a décrites l'astronome Ptolémée dans l'Almageste, vers 150. L'Almageste rassemble les connaissances astronomiques et mathématiques de l'époque.

L'histoire des constellations remonte bien avant les Grecs. Elles sont présentes dans toutes les cultures du monde. Les différentes cultures d'Asie et d'Europe — Basques, Hébreux ou peuples sibériens — connaissent toutes la Grande Ourse et y associent un mythe similaire. Selon la version courante, les quatre étoiles du corps de la « casserole » représentent un ours, poursuivi par des chasseurs, les trois étoiles du manche.

De façon surprenante, la même histoire est présente en Amérique du Nord avec quelques variations: les Cherokee, les Algonquins, les Zuni, les Tlingit ou les Iroquois partagent l'interprétation de l'ours poursuivi par trois chasseurs.

(Source: [http://www.pourlascience.fr/ewb\\_pages/a/article-l-origine-des-constellations-19751.php](http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/article-l-origine-des-constellations-19751.php))

Les étoiles ont donc été un sujet de curiosité, de mythes et d'intérêt depuis que l'Homme est sur cette terre.

Je tiens à souligner que j'ai trouvé intéressant de comprendre le phénomène de la création des étoiles et les conditions nécessaires à l'émergence de celles-ci. Je ne me serais pas imaginé que des éléments plus évolués aient été créés dans les étoiles. Que l'explosion en hypernovas a permis la distribution de matériaux (et métaux) dans l'Univers. Des

termes comme « supernovas » et « hypernovas » parsèment parfois les actualités, mais pas assez pour que notre esprit sache exactement ce qu'il en est. Voici une explication complémentaire au texte:

**Hypernova**: Explosion d'une étoile au moins 40 fois plus massive que le soleil. La luminosité, gigantesque, dépasse 100 fois celle d'une supernova. On pense que les étoiles progénitrices sont des étoiles supermassives n'existant qu'au tout début de l'histoire de l'Univers; de nos jours, très peu d'étoiles présentent de telles masses. Les sursauts gamma longs y trouveraient une explication. (Source: <http://www.futura-sciences.com/magazines/>)

[espace/infos/dico/d/univers-hypernova-4659/](http://www.futura-sciences.com/magazines/espace/infos/dico/d/univers-hypernova-4659/))

**Supernova**: Il s'agit d'une étoile qui meurt. Selon sa masse initiale, elle mourra ensuite discrètement en naine blanche ou de façon spectaculaire en supernova; dans ce second cas, son agonie peut même la conduire au stade de trou noir. (Source: <http://www.futura-sciences.com/magazines/sciences/recherche/?q=supernova>)

Si les étoiles d'autrefois ont contribué au monde d'aujourd'hui, c'est que le monde de demain sera aussi une nouvelle création!



L'amas d'étoiles très coloré NGC 457, qui se situe dans la constellation de Cassiopée. Image prise par Yves Tremblay le 20 septembre 2011, au foyer primaire d'une lunette de 120 mm *f*/7. Cet amas est souvent surnommé « le Hibou » ou encore « E.T. ». Nous avons tourné l'image originale pour permettre de mieux voir le personnage du film.

# Sous le Soleil : Mesure solaire

L'observation du Soleil procure beaucoup de satisfaction, notamment au point de vue de la diversité des taches, des filaments, ou encore des protubérances solaires. Mais comment estimer approximativement leur grosseur sans avoir recours à des méthodes de calcul scientifiques avancées ?

Il est possible pour tout astronome amateur d'effectuer des mesures de la surface du Soleil ou de la Lune, comme la taille d'une tache solaire ou d'un cratère lunaire. Certaines méthodes nécessitent des instruments et des calculs scientifiques plus avancés qui donneront des résultats très précis.

Évidemment pour ce genre de mesure, on doit connaître la distance de l'astre observé, soit la distance Terre-Soleil dans notre cas. Il faut aussi connaître le diamètre apparent du Soleil et, avec des équations fastidieuses, on obtiendra des mesures précises.

Il existe toutefois une méthode plus simple pour estimer grossièrement la taille d'une tache solaire ou d'un cratère sur la Lune. Il s'agit d'une méthode simple, peu précise certes, mais assez pour avoir une bonne estimation de la taille des taches solaires. Pour arriver à effectuer des mesures, il faut avoir un bon logiciel d'imagerie (Photoshop ou autre), une photo numérique du Soleil, et une image d'une sphère quadrillée,

facilement trouvable sur l'internet. Il est évident que l'on doit connaître le diamètre du Soleil; pour les exemples ci-dessous, j'utiliserai 1 390 000 km, ce qui est environ son diamètre équatorial.

Il faut d'abord trouver la valeur en kilomètres qu'un pixel représente sur notre photo. Pour ce faire, on calque (*stack*) en transparence la grille sphérique, qui doit être de même diamètre que le disque solaire de notre cliché; voir l'image du haut de la page suivante.

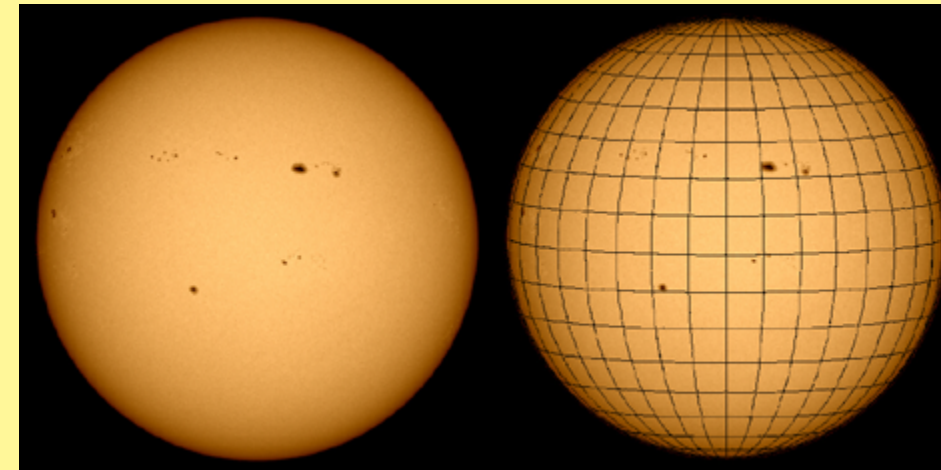
Il faut, autant que possible, sélectionner des taches qui se trouvent près de l'équateur et du méridien solaire pour avoir un meilleur estimé, afin d'éviter les erreurs induites par la perspective.

Maintenant, faisons un petit calcul simple. Comme le Soleil mesure 1 390 000 km de diamètre, on divise cette valeur par le nombre de sections de notre grille, ici 18<sup>[1]</sup>. Nous obtenons donc 77 222,2.

Il faut ensuite compter combien de pixels horizontaux se trouvent dans le carré (quadrillé de 10°) qui nous intéresse (le carré qui encadre la tache à mesurer); voir l'image du milieu de la page suivante. Dans l'exemple de l'image, on obtient horizontalement 144 pixels pour ce quadrillé de 10°.

Faisons encore un petit calcul : cette fois, on utilise le résultat de notre premier calcul, soit 77 222,2, que l'on divise par le nombre de pixels

## Mesure solaire



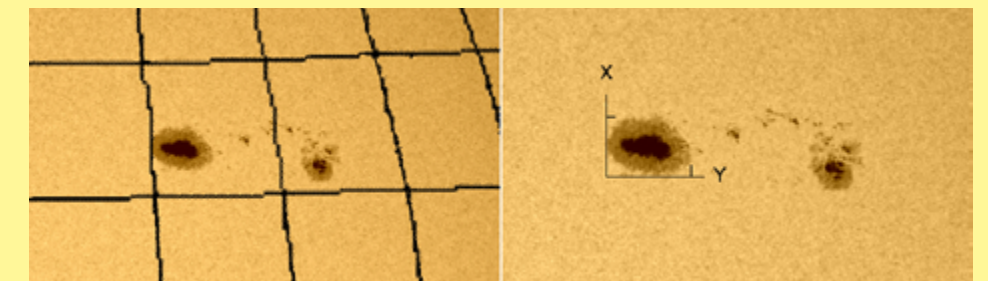
compris dans le carré de 10°, soit 144. On obtient donc 536,2 km; c'est l'échantillonnage approximatif des pixels dans cette région<sup>[2]</sup>.

Avant de continuer, on doit répéter les mêmes opérations dans le sens vertical.

Maintenant, nous sommes prêts pour effectuer notre estimation. Toujours en utilisant notre exemple, nous avons 536,2, valeur que l'on multiplie par le nombre de pixels horizontaux occupés par la tache que l'on veut mesurer : on obtient ainsi sa largeur (horizontale). On fait la même chose dans le sens vertical pour obtenir sa hauteur.

<sup>2</sup> C'est-à-dire que chaque pixel mesure, à la surface du Soleil, environ 536,2 km.

Pour un meilleur échantillonnage, on répète tout le processus à quelques reprises, par exemple trois fois.



Dans notre exemple, on peut estimer que la tache a une dimension de 34 500 km (Y) par 23 000 km (X).

Cette méthode simple nous permet de faire une estimation de la grandeur ou de la grosseur des

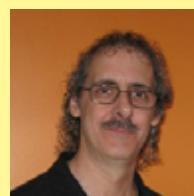
taches solaire. On peut la modifier légèrement pour obtenir la taille des filaments qui se détachent de l'atmosphère solaire, comme l'illustre l'image du bas de cette page.

L'utilité d'effectuer de telles mesures peut permettre, entre autres, d'identifier les types de taches solaires, car leur type dépend non seulement de leur forme, mais aussi leur taille<sup>[3]</sup>. On peut aussi suivre l'évolution de leur taille au fil des jours, que ce soit pour les taches, les filaments, ou les plages faculaires.

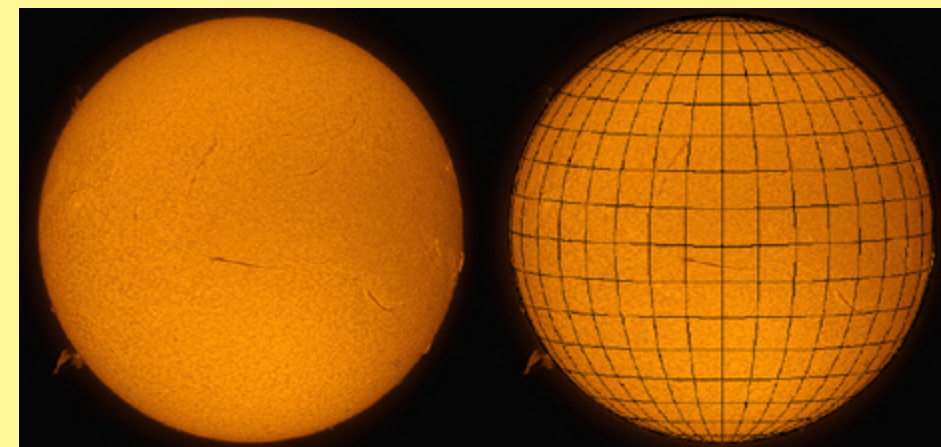
Photos : Stéphane Lemon et Ted Adachi.

Photomontages : Stéphane Lemon.

avec  
Stéphane  
Lemon



<sup>1</sup> À noter que certains sont presque invisibles, à gauche et à droite du disque, tellement ils sont aplatis par la perspective.



<sup>3</sup> LEMON, Stéphane. « Sous le Soleil exactement : La photosphère, Deuxième partie ». *Astronomie-Québec* vol. 1, n° 3 (septembre-octobre 2012), p. 16-17.



# Je CRAQ pour toi : Un Soleil variable

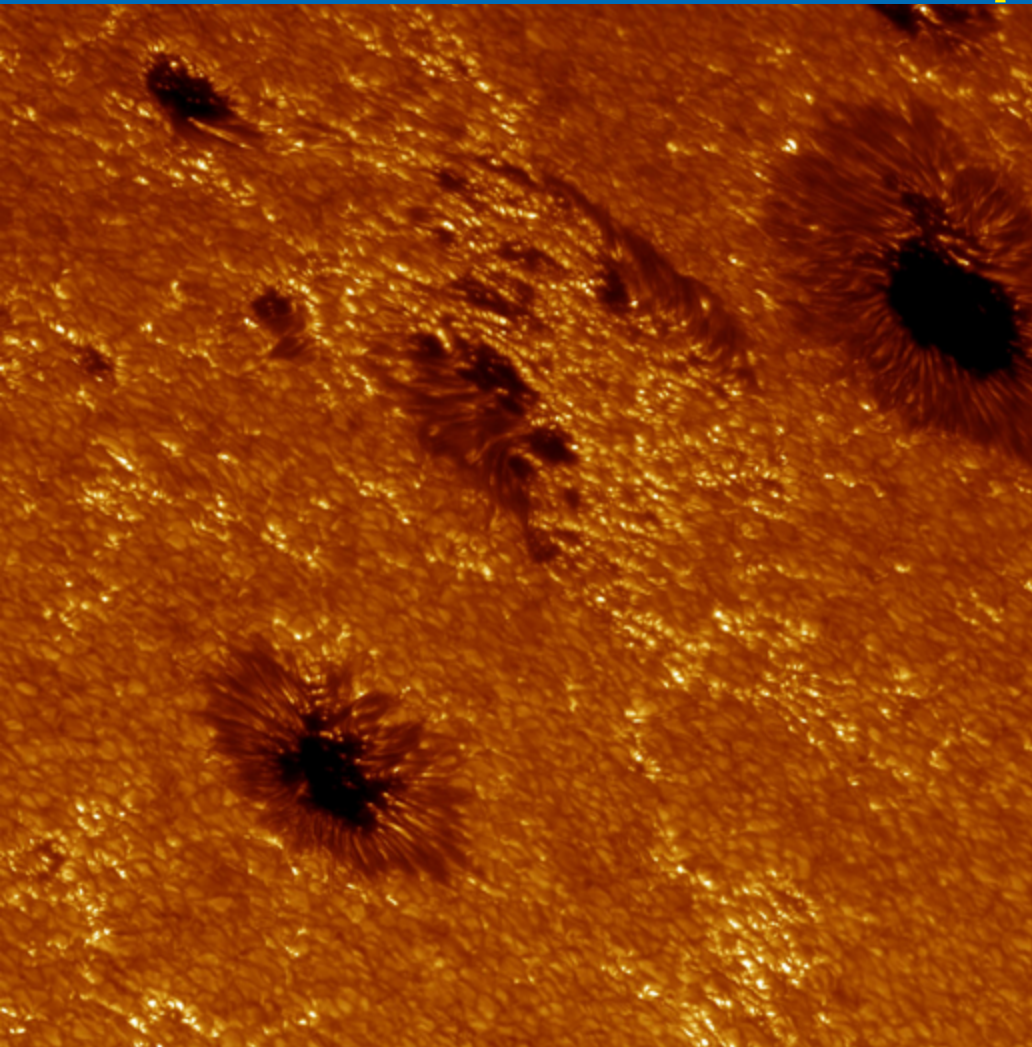


Image à haute résolution de la surface du Soleil obtenue avec le Swedish Solar Telescope (1 mètre de diamètre) à La Palma. On distingue clairement les taches sombres, entourées des petites facules brillantes.  
Image à 430,5 nm (bande G) capturée le 29 juin 2003 par Dan Kiselman, Institute for Solar Physics (ISP), et traitée par Mats Löfdahl, ISP. Crédit : L'Académie Royale des Sciences de Suède / SST / Dan Kiselman.

Au cours de mes études doctorales, je me suis intéressée à la variation de l'irradiance solaire, qui est définie par l'énergie émise par le Soleil qui est reçue au haut de l'atmosphère terrestre par unité de surface. En termes plus simples, la luminosité du Soleil varie en fonction du temps, en particulier à cause de son activité magnétique, et j'ai contribué à l'élaboration d'un modèle numérique permettant de reconstruire cette quantité dans le passé. Tout d'abord, j'expliquerai rapidement l'origine de la variabilité solaire, puis la façon dont nous la calculons pour les siècles passés. Je terminerai avec l'une des applications qui motive la recherche en physique solaire.

Heureusement pour les êtres diurnes intéressés par l'astronomie, il est possible d'observer des phénomènes célestes fascinants en plein jour : vous aurez probablement tous eu la chance d'observer des taches solaires au télescope. Ces dernières constituent des zones où le champ magnétique est fortement concentré, de telle sorte que les cellules de convection transportant l'énergie vers la surface du Soleil en sont détruites. L'énergie n'étant plus transportée vers l'extérieur, ces endroits sont « froids » et donc plus sombres que leur environnement. Il existe toutefois d'autres structures magnétiques un peu moins connues, mais aussi présentes à la surface du Soleil en période de forte activité : ce sont les facules, illustrées en haut à gauche.



avec **Cassandra Bolduc**  
PhD en astrophysique, Université de Montréal  
Chercheuse postdoctorale, PMOD/WRC

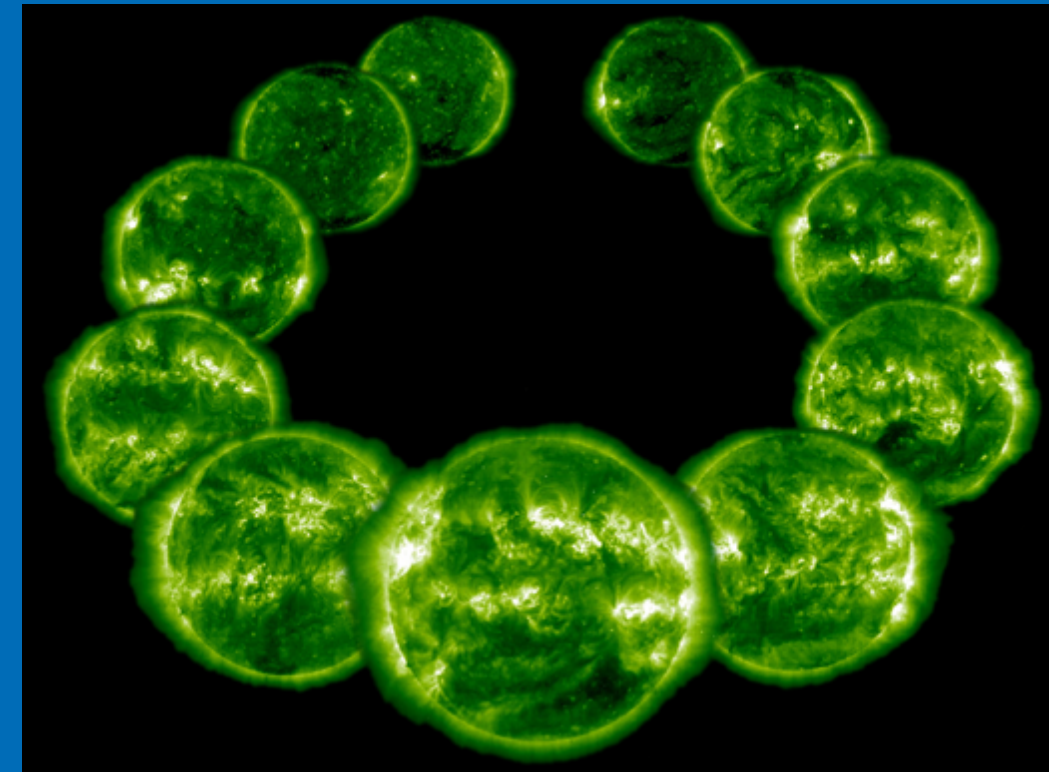
Elles sont de diamètre inférieur aux taches et par conséquent,

sont inefficaces pour inhiber la convection. D'autre part, la différence de pression entre la facule et son milieu environnant implique qu'à une même profondeur géométrique, la profondeur optique dans la facule est plus faible qu'autour d'elle. En termes simples : la facule nous permet de voir plus profondément dans l'atmosphère, donc de voir les couches plus chaudes. Elle est donc plus brillante que le reste de la surface !

Il a été démontré que si l'on considère l'énergie émise par la photosphère non-magnétisée, qu'on lui soustrait l'assombrissement causé par toutes les taches et qu'on lui ajoute la brillance provenant de toutes les facules, on peut très bien reproduire les variations de l'irradiance solaire au cours du cycle de 11 ans<sup>[1]</sup>. En fait, la brillance des facules surcompense l'assombrissement des taches, de sorte que lorsque le Soleil présente plus de taches, il est aussi plus brillant.

Malheureusement, pour effectuer ce calcul, on doit avoir sous la main des images à très haute résolution permettant de déterminer précisément l'aire couverte par chacune de ces structures. Ces données sont disponibles depuis l'avènement des observations par satellite, ou sur Terre grâce à l'optique adaptative. Par conséquent, pour reculer dans le passé plus lointain, il faut faire

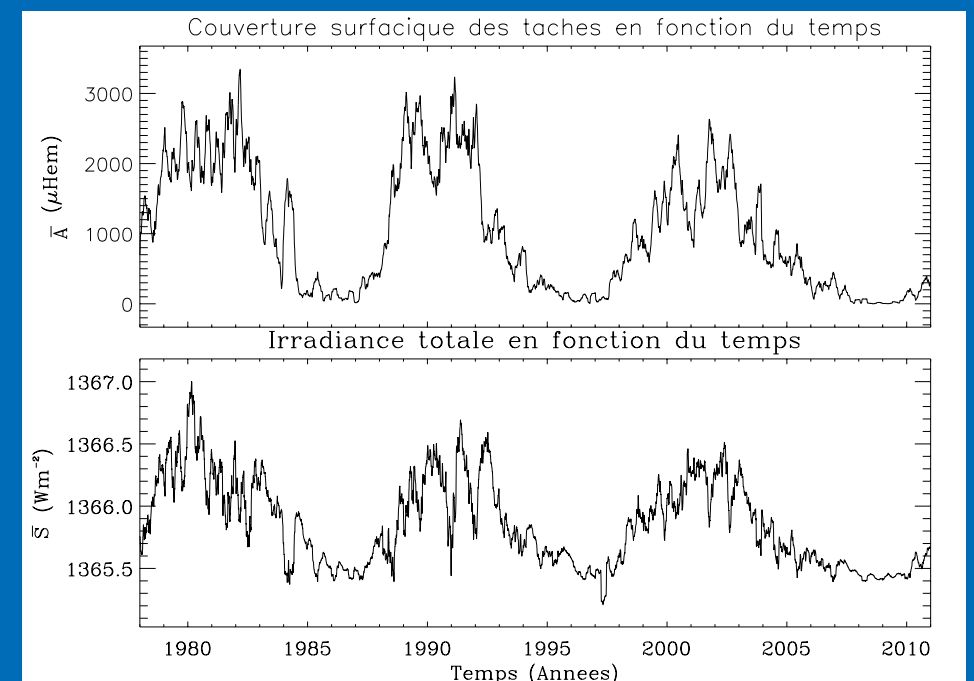
1 SOLANKI, Sami K., Natalie A. KRIVOVA, et Joanna D. HAIGH. « Solar Irradiance Variability and Climate ». *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* vol. 51 (2013), p. 311-351.



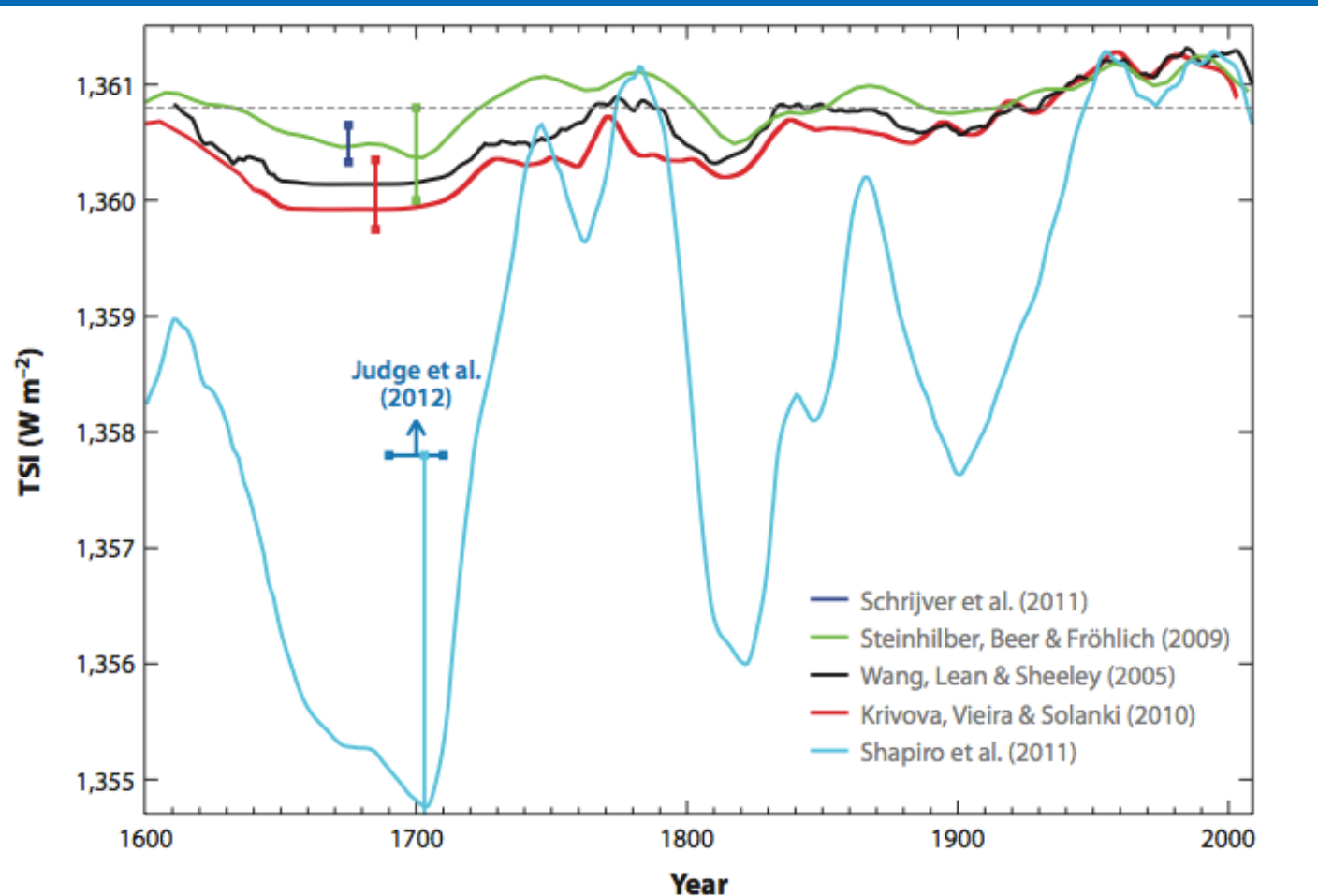
Images obtenues à différents moments du cycle d'activité dans les longueurs d'onde de l'extrême ultraviolet (fausses couleurs). Les images d'arrière-plan ont été obtenues durant une période d'activité plus faible, tandis que celles du premier plan ont été obtenues près du maximum d'activité, quand le nombre de taches a atteint son paroxysme. Globalement, le Soleil est plus brillant quand il est plus actif. Notez que les taches sont presque invisibles à ces longueurs d'ondes : les régions actives sont définitivement plus brillantes !  
Crédit : ESA & NASA / SOHO.

preuve d'un peu d'ingéniosité. Certains scientifiques utilisent un indicateur d'activité solaire, par

exemple le nombre de taches sombres ou l'abondance de certains isotopes radioactifs dans les



Le graphique du haut montre l'aire totale occupée par les taches solaires en fonction du temps depuis la fin des années 1970. Les trois cycles solaires sont bien mis en évidence. Le graphique du bas montre l'irradiance totale pour la même période.



Ce graphique montre quelques reconstructions de l'irradiance totale débutant en 1600. Notez que les indicateurs d'activité utilisés ont souvent une résolution temporelle de plusieurs années ou décennies ; il est donc impossible de distinguer le cycle de 11 ans dans ces cas. Toutes les reconstructions ont été lissées afin d'avoir la même résolution temporelle. Les divers indicateurs utilisés et les différentes hypothèses de base des modèles sont responsables des écarts d'une simulation à l'autre.

glaces polaires. Ayant des mesures récentes, ils étalonnent une relation entre l'irradiance telle qu'observée depuis les trois derniers cycles et cet indicateur. Ensuite, il suffit de calculer l'irradiance passée en fonction de la valeur passée de l'indicateur.

Ces reconstructions sont assez incertaines, puisque les cycles récents étaient très similaires et que les relations établies ne sont probablement pas valides pour des cycles d'activité de très forte amplitude, ou au contraire, de très faible amplitude. Une voie alternative, que nous avons empruntée, est de simuler la physique de la surface du Soleil à partir de l'un de ces indicateurs. Par exemple, nous avons développé un modèle basé sur les données

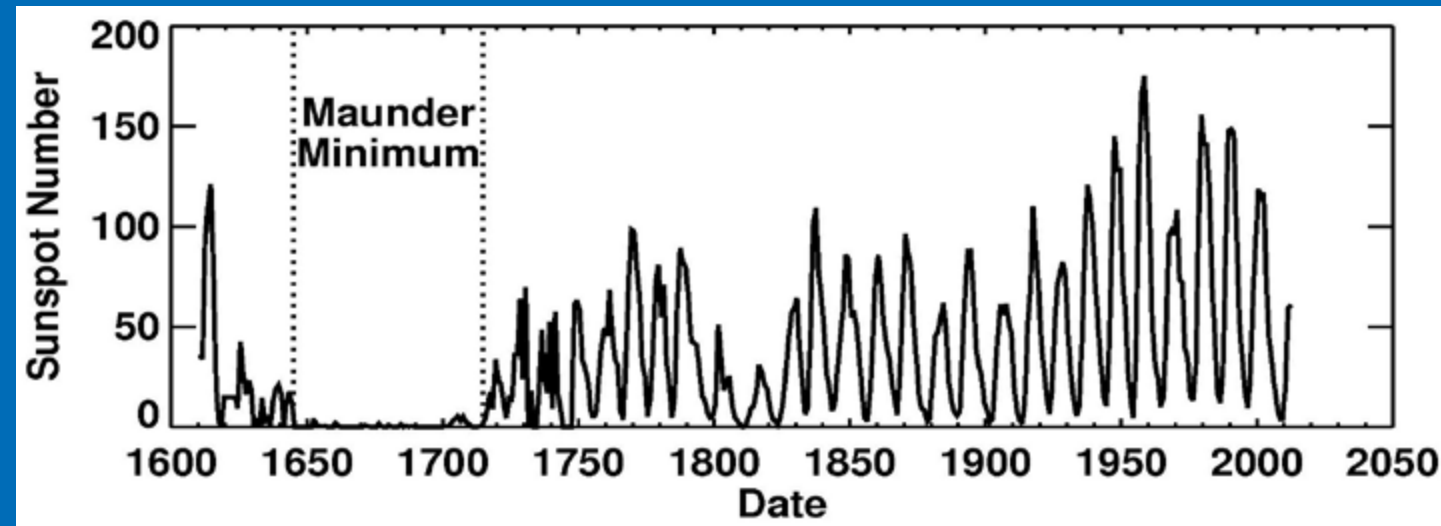
sur l'émergence des taches solaires. Il simule l'apparition des taches et leur évolution. Elles se fragmentent et se désintègrent en plus petites structures au cours du temps, ce qui produit les facules brillantes. Ainsi, pour chaque jour pour lequel on a observé les taches solaires (les données sont assez complètes à partir de 1874), on obtient une distribution artificielle de l'aire des taches et des facules qui respecte les statistiques observées. On n'a ensuite qu'à combiner leur assombrissement et leur brillance respective pour produire une reconstruction de l'irradiance. Ce modèle est en partie basé sur le hasard ; par conséquent, il ne donne pas un résultat exact à une journée donnée, mais plutôt une estimation de la variation temporelle qui est

fiable pour une durée d'un mois ou plus. Grâce à des ajustement récents, nous avons pu étendre notre intervalle temporel aux 400 dernières années<sup>[2]</sup>.

Les reconstructions couvrent ainsi l'intervalle de temps incluant le Minimum de Maunder, qui est une période comprise entre 1645 et 1715 durant laquelle presque aucune tache solaire n'a été observée.

Cette époque coïncide avec le Petit Âge Glaciaire, durant lequel les températures moyennes en Europe de l'Ouest et en Amérique de l'Est

2 BOLDUC, Cassandra, Paul CHARBONNEAU, Roxane BARNABÉ, et Michel S. BOURQUI. « A Reconstruction of Ultraviolet Spectral Irradiance During the Maunder Minimum » *Solar Physics* vol. 289, n° 8 (2014), p. 2891-2906.



Nombre moyen de taches solaires par années en fonction du temps. Notez l'interruption presque complète du cycle solaire entre 1645 et 1715 : c'est le Minimum de Maunder.

étaient significativement inférieures à la moyenne. La disparition des taches solaires a-t-elle pu causer ce changement climatique par le biais d'une baisse de l'irradiance ? Cette question est toujours ouverte et pousse les scientifiques à analyser l'impact de la variabilité solaire sur le climat.

L'un des impacts les plus probables est un changement de la concentration d'ozone stratosphérique, connue généralement comme la « couche d'ozone ». Sa densité est influencée par les rayons ultraviolets provenant du Soleil. De manière générale, lors des maxima d'activité, la concentration d'ozone augmente, et inversement, elle diminue lors des minima. Ces changements occasionnent un éventail de bouleversements dans l'atmosphère, qui pourraient résulter en un changement de température à certains endroits de la surface terrestre. Ces effets sont toutefois relativement faibles par rapport à la variabilité naturelle de l'atmosphère (pensons par exemple à l'oscillation El Niño) et sont donc difficiles à isoler et à quantifier précisément.

Pour ma part, j'ai utilisé un modèle simple calculant les réactions chimiques dans la stratosphère en fonction du spectre solaire. Le but est de mettre en évidence la sensibilité des réactions chimiques aux subtiles différences provenant de différents spectres solaires et pour divers niveaux d'activité magnétique. Nous avons démontré que bien que les différents modèles utilisés pour reconstruire les spectres produisent des résultats en bon accord les uns avec les autres, les petites différences qui subsistent induisent des écarts significatifs dans les concentrations d'espèces chimiques stratosphériques. Cela indique que nos modèles manquent encore de précision et qu'il faudra encore beaucoup de travail avant de déterminer avec certitude l'impact du Soleil sur le climat passé. Toutefois, nous savons que cet effet est minime par rapport à l'influence des émissions de gaz à effet de serre produites par l'humain et qu'un éventuel minimum solaire ne pourrait contrecarrer les changements engendrés depuis le début de l'ère industrielle<sup>[3]</sup>.

3 MEEHL, Gerald A., Julie M. ARBLASTER, et Daniel R. MARSH. « Could a future "Grand Solar Minimum" like the Maunder Minimum stop global warming? » *Geophysical Research Letters* vol. 40, n° 9 (2013), p. 1789-1793.



Cette chronique est présentée en collaboration avec le Centre de Recherche en Astrophysique du Québec (CRAQ; <http://craq-astro.ca>). À chaque édition d'*Astronomie-Québec*, un membre du CRAQ présentera son projet de thèse de doctorat. Remerciements à M. Luc Turbide.

# La Lune t'écoeure ? Choque-toi pas ; va jouer avec !

## Le canal de Pitatus / Hesiodus et un bonbon rond aux fruits

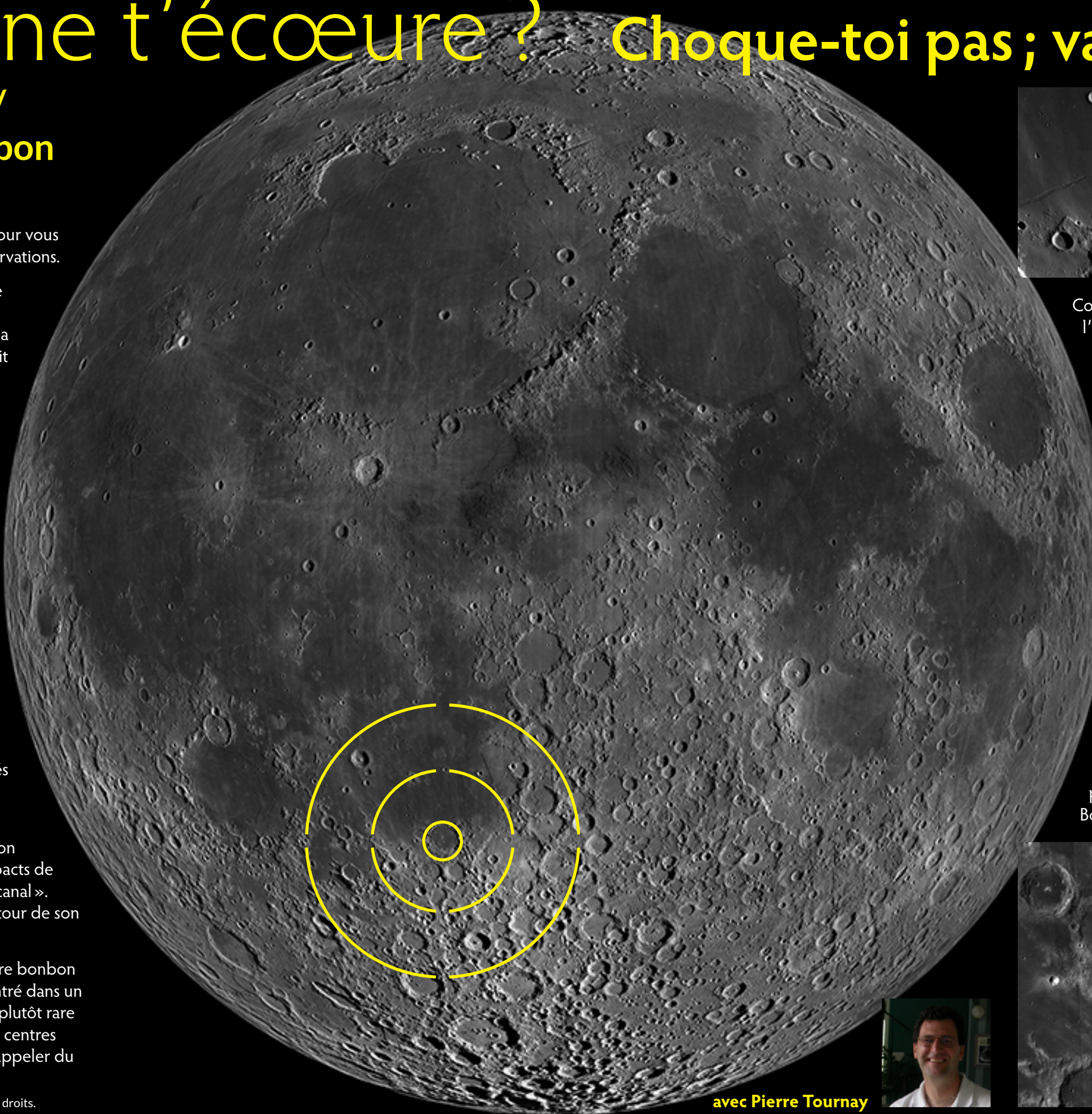
Voici une région qui offre plusieurs cibles pour vous faire plaisir et pour relever des défis d'observations.

Une journée après le premier quartier, cette région se présente à nous pour nous faire apprécier ses petits secrets. Dans l'Atlas de la Lune d'Antonin Rükl, à la carte 54, Pitatus fait 100 km de diamètre, et Hesiodus 44 km. Toutefois, si vous observez bien, vous verrez un très beau canal qui relie les deux cratères (voir la photo en haut de la page suivante). Pitatus a deux pics centraux, tandis que Hesiodus a un cratère en son centre. L'énorme Pitatus a un intérieur de lave refroidie qui est doux et plat ; par contre, cette lave, en se refroidissant, s'est contractée et a créé des crevasses tout le tour du cratère. Êtes-vous capables de faire le tour et de les suivre partout ? Remarquez les taches pales dans son cirque. J'en vois six, autour de quelques petits impacts ; c'est de l'éjecta plus jeune (~100 millions d'années) causé par ces petits impacts. La région nord de Pitatus comprend quelques cratères semi-engloutis. Ceux-ci ont été créés avec un angle et la lave chaude (à l'époque) n'a pas pu complètement les engloutir.

Allons voir le voisin Hesiodus maintenant. Son impact central est accompagné de deux impacts de plus en plus petits et qui pointent vers le « canal ». Hesiodus a aussi des crevasses dans le pourtour de son cirque, mais elles sont plus fines.

En position 7 h sous Hesiodus se trouve notre bonbon rond aux fruits<sup>[1]</sup> : ce n'est qu'un cratère centré dans un cratère plus vieux, mais c'est une formation plutôt rare sur la Lune. Leur nom officiel est « cratères à centres concentriques », mais c'est plus facile à se rappeler du nom du bonbon...

<sup>1</sup> N'avons pas le droit d'en nommer la marque, question de droits.



Complètement à gauche sur notre image (à l'ouest de Hesiodus) se trouve une longue et large fente dans le sol lunaire : il s'agit de Rima Hesiodus. C'est une fissure dans le sol, qui mesure 300 km de long et dépasse la largeur de notre première image ; je vous invite donc à regarder l'image ci-dessous. Si vous observez cette fente tout près de Hesiodus, vous pourrez détecter de tout petits impacts de 17 km de diamètre, soit à peu près la largeur de cette fissure... Imaginez une fissure comme ça sur la Terre... ça fait réfléchir !

Par contre, pour voir cette fissure dans toute sa longueur, il vous faudra observer pendant quelques nuits consécutives, car le terminateur devra se déplacer pour que vous puissiez la voir au complet !

Quelles seront les surprises en chemin ? J'en voit déjà trois... mais ce sera pour un prochain numéro d'*Astronomie-Québec* ! Bonnes observations !



avec Pierre Tournay



# Le nuage de formation d'étoiles RCW 34

*Crédit : ESO.*

La région la plus rayonnante de cette nébuleuse brillante notée RCW 34 abrite un gaz chauffé par de jeunes étoiles, qui emplissent l'environnement constitué de gaz plus froid. Lorsque l'hydrogène, porté à une température élevée, atteint les limites du nuage de gaz, il explose dans le vide à la manière d'une bouteille de champagne que l'on débouche — ce processus a d'ailleurs été baptisé « flux de champagne ». Au-delà de ces quelques bulles, la jeune région de formation stellaire RCW 34, et plus particulièrement le nuage qu'elle abrite, semble avoir été le siège de plusieurs épisodes de formation stellaire.

Détails au <http://www.eso.org/public/france/news/eso1521/>