

# LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 133 - Mars 2011 7 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Numéro 133 - printemps 2011



ISSN 0758-234X

## Comité de Liaison Enseignants Astronomes

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

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

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

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

### Présidents d'honneur :

Jean-Claude Pecker  
Lucienne Gouguenheim,  
Georges Paturel

### Bureau du CLEA pour 2011

**Présidente** : Cécile Ferrari  
**Trésorier** : Jean Ripert  
**Trésorière Adjointe** : Roseline Jamet  
**Secrétaire** : Christian Larcher  
**Secrétaire Adjoint** : Jean-Luc Fouquet

### Responsables des groupes

**Vie associative** : Jean-Michel Vienney

**Cahiers Clairaut** : Christian Larcher

**Productions Pédagogiques** : Pierre Causeret

**Communication** : Charles-Henri Eyraud

**École d'Été d'Astronomie**: Danièle Imbault

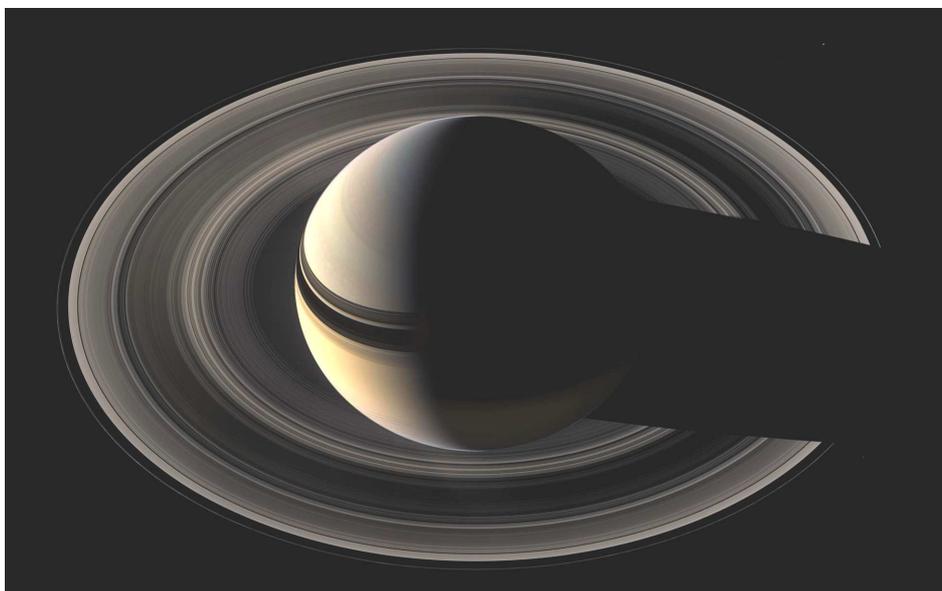
**Responsables du site** :

Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud

Merci à tous celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce Cahiers Clairaut, nous citerons : Jean-Yves Beauchot, Vincent Boudon, Danielle Briot, Francis Berthomieu, Pierre Causeret, Titouan Coislier, Hervé Faivre, Cécile Ferrari, Jean-Luc Fouquet, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Florian Livet, Philippe Malburet, Lionel Muller, Corentin Pasquier, Jean Ripert, Daniel Toussaint, Jean-Michel Vienney.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 133, afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Nous nous excusons auprès de ceux qui nous ont envoyé des articles que nous n'avons pas encore publiés.



Saturne en croissant telle qu'on ne la verra jamais depuis la Terre.

On peut voir à gauche l'ombre des anneaux sur la planète et à droite l'ombre de la planète sur les anneaux. Cette image en vraies couleurs a été réalisée par la sonde Cassini en octobre 2007.

Crédit: Cassini Imaging Team , SSI , JPL , ESA , NASA

# Les Cahiers Clairaut

Printemps 2011 n° 133

## Éditorial

En ce début de printemps, Saturne se trouve à l'opposé du Soleil, une occasion d'observer en détail la sixième planète du système solaire comptée à partir du Soleil. Elle était perçue par Galilée comme une planète triple, ensuite on l'imagina comme une planète à oreilles ou à poignées avant qu'elle soit reconnue comme l'admirable planète à anneaux que nous connaissons. Dans la mythologie romaine Saturne représentait le dieu qui dévorait ses enfants pour qu'ils ne puissent pas prendre sa place. Cécile Ferrari qui connaît bien cette planète nous propose trois énigmes la concernant.

En restant sur Terre vous découvrirez comment on peut la "peser" ou, avec les élèves du collège de Semur-en-Auxois, en faire une maquette. Enfin vous essayerez de vous y retrouver dans les noms des nombreux satellites qui portent le nom de dieux ou de déesses héros des contes joyeux et immoraux de la mythologie grecque. Parmi ces satellites Titan joue un rôle à part. C'est en effet le plus gros, sa taille dépasse celle de la Lune ou de la planète Mercure. La masse de Titan lui permet de maintenir une atmosphère dont la couleur orange est évoquée sur la couverture de ce numéro. Son atmosphère, qu'étudie Vincent Boudon, est le siège d'une chimie organique pouvant créer des molécules complexes, premières briques de la vie.

Pour en savoir plus sur ce qu'il convient de chercher comme indice de la présence de vie, Danielle Briot étudie la lumière cendrée de la Lune c'est-à-dire "le clair de Terre sur la Lune".

Enfin avec les élèves du lycée Léonard de Vinci de Montaigu qui ont obtenu cette année un premier prix au concours des Olympiades de physique vous saurez comment l'on peut déterminer la forme d'un astéroïde à partir de ses variations de luminosité en fonction du temps.

Christian Larcher, pour l'équipe.

*Merci à toutes celles et ceux qui nous ont adressé leurs vœux et/ou qui nous ont fait part de leur satisfaction, tout en encourageant l'équipe.*

*Les bénévoles du CLEA*

### *Avec nos élèves*

**Exploitation de spectres à basse résolution avec VSpec.**

Jean-Michel Vienney p 2

**Thème : SATURNE** p 8

**Saturne : notions de base**

Pierre Causeret p 9

### *Article de fond*

**Le système de Saturne, d'un solstice à l'autre**

Cécile Ferrari p 11

**Mots croisés Saturne** p 15

### *Article de fond*

**Titan**

Vincent Boudon p 16

### *Avec nos élèves*

**Comment peser Saturne**

Jean-Yves Beauchot p 21

### *Avec nos élèves*

**Maquette de Saturne**

Hervé Faivre p 23

### *Histoire*

**D'où viennent les noms des satellites de Saturne ?**

Jean Ripert p 25

### *Avec nos élèves*

**Calculs sur Saturne**

Pierre Causeret p 27

### *Article de fond*

**La lumière cendrée de la Lune, ce qu'en font les astronomes.**

Danielle Briot p 28

### *Lecture pour la Marquise*

Christian Larcher p 32

### *Avec nos élèves*

**Herculina a la forme ...**

Corentin Pasquier, Titouan Coislisier, Florian Livet p 33

### *Ciel de printemps*

Pierre Causeret p 37

### *Vie de l'association*

**Assemblée Générale à Bordeaux**

Jea-Luc Fouquet p 38

### *Observation*

**Éclipse de Lune du 15 juin** p 40

**Solutions mots croisés** p 40

# RÉALISATION

## Exploitation de spectres à basse résolution avec VSpec

Jean-Michel Vienney

*Dans le précédent numéro nous avons vu comment on pouvait obtenir un spectre stellaire.*

*Nous allons maintenant voir comment on peut, en utilisant le logiciel libre VSpec, obtenir un "profil spectral", puis le corriger de la "réponse instrumentale", et enfin accéder à la température ou à la classe spectrale de l'étoile étudiée.*

### I Du spectre 1D au "profil spectral brut" étalonné

Dans l'article précédent, nous avons expliqué comment obtenir une image en niveaux de gris du spectre de Véga, et vu qu'on pouvait déjà y identifier les principales raies d'absorption.

On suppose maintenant qu'on dispose de plusieurs spectres, obtenus au cours d'une même séance d'acquisition et avec le même montage, et qui ont été traités de la même manière.

Ici, ce sont des spectres de Véga, Alioth, Dubhe et Arcturus, obtenus le 29 juin 2010.



*Fig.1. Spectres redressés avant découpage. De haut en bas ceux de Véga, Alioth, Dubhe, Arcturus.*

Les fichiers vega1d.fit et dubhe1d.fit sont disponibles sur le site du CLEA à partir du sommaire de ce numéro dans la rubrique cahiers Clairaut, ou à l'adresse <http://www.ac-nice.fr/clea/SommCC133.html>.

Les autres fichiers cités dans l'article (alioth1d.fit, arcturus1d.fit), leurs versions "découpées" ainsi que les profils spectraux obtenus avec VSpec ne sont accessibles qu'aux abonnés "numérique" à l'adresse <http://accés.inrp.fr/clea/vieclea/nouvelles-productions/spectro/> (ils y trouveront également un forum pour échanger avec l'auteur)

Pour commencer extrayons de ces spectres la partie "utile" (qui correspond en gros au "domaine visible", et plus précisément à la "bande passante" du capteur utilisé). Elle s'étend approximativement de 1 200 à 1 900 pixels à partir de l'image d'ordre 0 (bande brillante à gauche de chaque spectre).

On charge dans IRIS le fichier correspondant à Véga, qui va nous servir de référence : (attention

pour conserver la dynamique, il faut sauvegarder et charger les fichiers au format FITS ou au format PIC : les formats JPEG ou BMP ramènent les images à 256 niveaux de gris) ...

### Comment se procurer VSpec ?

La meilleure solution est de télécharger ce logiciel sur le site de son auteur, Valérie Desnoux à l'adresse : <http://astrosurf.com/vdesnoux/index.html>

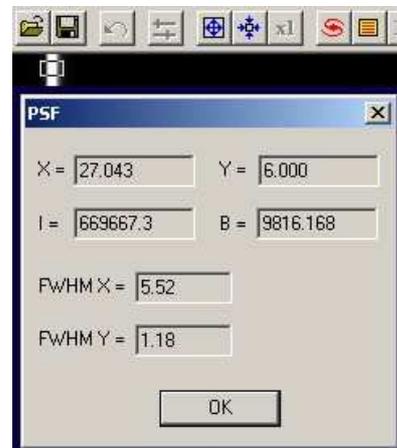
En plus de la dernière version du logiciel on trouvera une documentation complète (140 pages en français), mais aussi de nombreux exemples et "tutoriels" mais la plupart sont écrits en anglais.

Il y a aussi une version française, mais moins à jour, à l'adresse :

<http://astrosurf.com/vdesnoux/sitefr/>

On y trouvera en plus de nombreuses données sur la spectroscopie, et des plans pour la réalisation de spectroscopes.

On repère alors aussi précisément que possible le barycentre de l'image de l'étoile (on peut ici utiliser la fonction "PSF" d'Iris, accessible par clic droit après avoir encadré l'image de l'étoile). Pour Véga, on obtient  $x = 27$  pixels (figure 2).



*Fig.2. Fenêtre PSF d'Iris.*

On découpe la partie intéressante en saisissant la commande "window 1227 1 1927 20" puis on enregistre l'image au format FITS.

On procède de la même manière avec les trois autres spectres. Les fichiers correspondants sont nommés respectivement : vega1d\_1200\_1900.fit , alioth1d\_1200\_1900.fit, dubhe1d\_1200\_1900.fit et arcturus1d\_1200\_1900.fit.

Le travail sous IRIS est maintenant terminé, on peut le fermer et ouvrir le logiciel VSpec.

Sous VSpec on commence par charger le fichier image contenant le spectre à étudier (ici vega1d\_1200\_1900.fits) à l'aide de la fonction "Fichier/Ouvrir Image". Une fenêtre s'ouvre alors qui contient l'image du spectre1d (figure 3).



Fig.3. Fenêtre VSpec.

On va alors pouvoir obtenir un premier profil spectral en utilisant la fonction "binning objet" accessible par un des boutons de la barre d'outils (figure 4).



Fig.4. Fonction "binning objet".

Le profil spectral apparaît alors dans une nouvelle fenêtre. Il est possible de la redimensionner, de faire ou non apparaître les échelles. On observera surtout que de nouvelles fonctions sont apparues dans la barre de menus (figure 5).

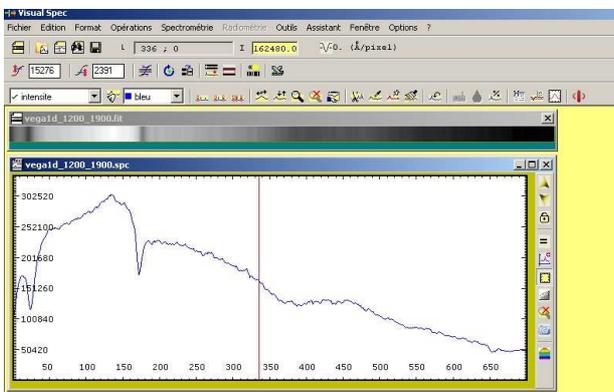


Fig.5. L'écran de Vspec après l'extraction du premier profil spectral. Remarquer le curseur (barre verticale) et la graduation en pixels de l'axe des abscisses.

En promenant le curseur sur le graphique, on peut lire son abscisse en pixel (L) et son ordonnée (I) dans une unité arbitraire (en fait la somme sur la colonne correspondante de l'image des intensités codées en niveaux de gris).

Une nouvelle barre d'outils est aussi apparue, qui va nous permettre d'étalonner le profil en longueur d'onde.

Plusieurs méthodes sont envisageables :

- avec une seule raie (il faut alors connaître la "dispersion" en Å/pixel) ;
- avec deux raies ;
- avec plus de deux raies si on ne veut pas se contenter de l'approximation "affine".

Nous avons déjà identifié les deux raies de l'hydrogène très marquées dans le spectre de Véga (à 4 340,5 Å et 4 861,3 Å). Nous allons donc les utiliser.

Le détail des opérations est un peu fastidieux à décrire ici mais très bien documenté et assez intuitif. Le principe consiste, après avoir cliqué sur le bouton "calibrage avec 2 raies" et précisé que le spectre étudié sert aussi de référence, à encadrer successivement avec le pointeur de la souris les deux raies choisies, et à préciser pour chacune la longueur d'onde correspondante (en Å).

Cette opération faite, on peut lire dans la barre de menus la valeur de la dispersion : 3,53 Å/pixel, ce qui est relativement proche de la première détermination (3,56 Å/pixel) faite avec IRIS. Quand on déplace le curseur sur le spectre, l'abscisse est maintenant affichée à la fois en pixel et en Å (figure 6).

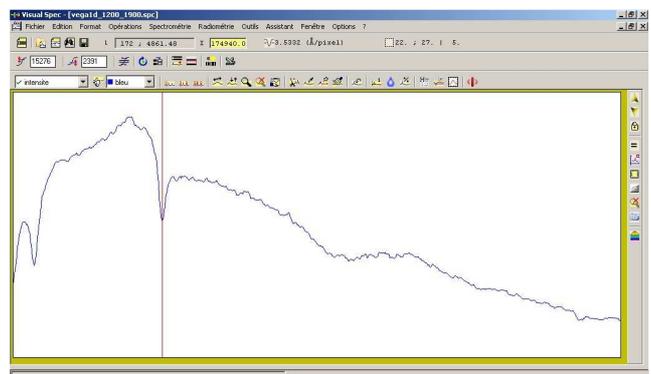


Fig.6. Capture d'écran, le spectre brut étalonné en longueur d'onde. Le curseur est placé sur la raie Hβ qui a servi à l'étalonnage.

## II Identification des raies spectrales et comparaison avec un spectre de référence

Parmi les nombreux outils disponibles, Vspec dispose d'une banque de données spectroscopiques qui permet d'afficher les raies d'un élément et leurs longueurs d'onde.

Cette fonction est accessible par le menu "Outils/Elements". Nous allons l'utiliser pour faire apparaître les raies de l'hydrogène et de l'hélium : il suffit d'ouvrir le menu, sélectionner chaque élément, trier puis exporter pour voir les raies s'afficher sur le profil. Il n'est pas surprenant de constater la coïncidence des raies qui ont servi à l'étalonnage, mais on est aussi content de voir que la raie H $\alpha$  de l'hydrogène correspond assez bien avec un "creux" sur le profil spectral (figure 8).

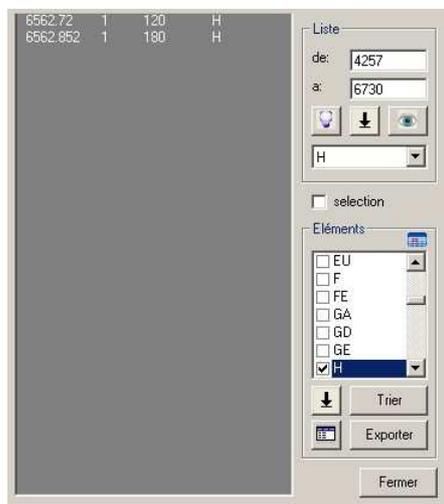


Fig 7a : Pour afficher les raies de l'hydrogène.

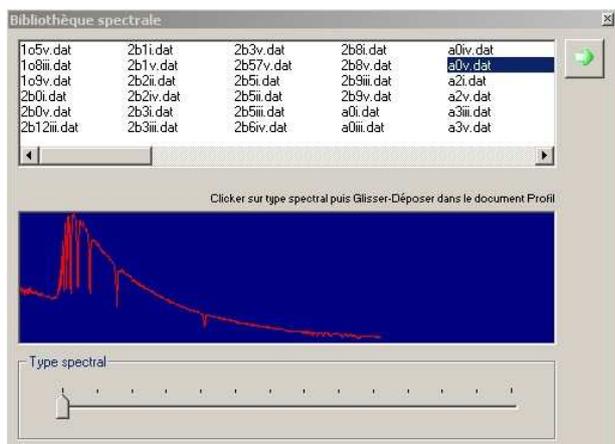


Fig.7b. Le spectre d'une étoile A0V donné par la banque de spectres.

VSpec dispose aussi d'une banque de spectres de référence qui est accessible par le menu

"Outils/Bibliothèque". Si le type spectral de l'étoile est connu (c'est le cas pour Véga qui est de type A0 V) il suffit de le sélectionner dans la banque pour afficher un spectre de référence qu'on peut comparer à celui qui est en cours d'analyse.

On remarque alors tout de suite que si les principales raies d'absorption coïncident relativement bien, il en va tout autrement pour l'intensité.

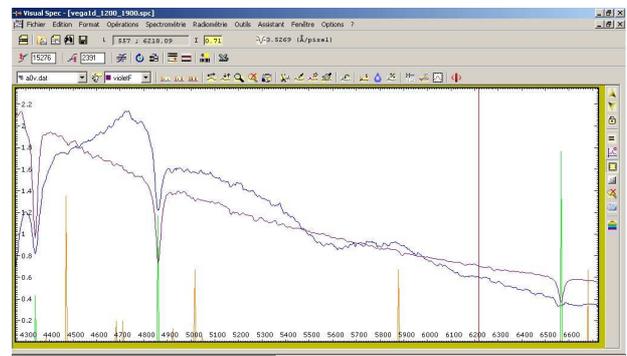


Fig.8. On a demandé l'affichage des raies de l'hydrogène (vert) et de l'hélium (orangé), ainsi que le spectre d'une étoile de type A0 V issu de la banque de spectres.

Ceci n'est pas surprenant : l'intensité mesurée dans notre spectre n'a pas été corrigée de la "réponse instrumentale". Ce sera la prochaine étape de notre traitement.

## III Qu'est-ce que la "réponse instrumentale", et comment l'obtenir ?

Pour une longueur d'onde donnée, le nombre figurant en ordonnées du profil spectral est bien proportionnel à la quantité de lumière reçue pendant la pose. Malheureusement la constante de proportionnalité dépend de la longueur d'onde de la radiation étudiée : la sensibilité du capteur n'est pas la même pour le rouge, le jaune ou le bleu. D'autre part la lumière que nous recevons d'une étoile doit, entre autres, traverser l'atmosphère terrestre, dont les effets en terme d'absorption dépendent de la longueur d'onde, mais aussi de l'épaisseur d'air traversée (donc de la hauteur de l'astre observé) et de sa "transparence", qui peut être très variable d'une nuit à l'autre.

On va ici, pour simplifier, considérer que pour une longueur d'onde donnée, l'intensité  $I_M(\lambda)$  mesurée par le capteur est égale au produit de l'intensité réelle  $I_R(\lambda)$  par un facteur  $R(\lambda)$  dépendant de la longueur d'onde et qui prend en compte aussi bien la réponse du capteur que les effets de l'atmosphère.  $I_M(\lambda) = R(\lambda) \cdot I_R(\lambda)$ .

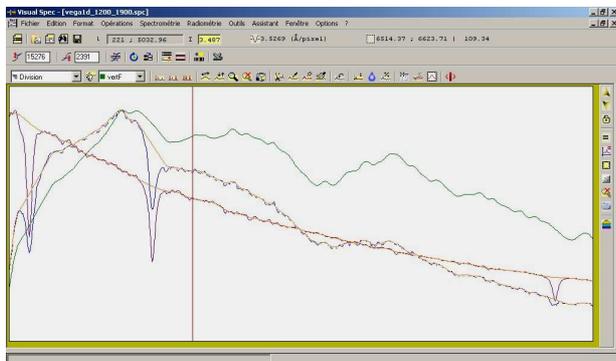
C'est cette fonction  $R(\lambda)$  que nous appellerons dorénavant (et par abus de langage) "réponse instrumentale" (il faudrait en fait découpler les effets du capteur des effets de l'atmosphère, ce qui n'est possible que si l'on sait modéliser les effets de l'atmosphère).

Moyennant ce parti pris, il nous est maintenant possible de déterminer la "réponse instrumentale" : il suffit de diviser pour chaque longueur d'onde la valeur mesurée par la valeur correspondante du spectre de référence :  $R(\lambda) = I_M(\lambda) / I_R(\lambda)$ .

On suppose de plus que la réponse instrumentale ne varie pas brutalement en fonction de la longueur d'onde : on va donc, avant de faire la division, lisser les deux courbes.

Ce lissage peut par exemple se faire en utilisant la fonction "**Radiométrie/Extraire le continuum**" : on découpe d'abord les parties correspondant aux raies d'absorption profondes, puis on règle le coefficient du filtre de manière à obtenir une courbe lissée (mais pas trop).

On peut alors effectuer la division. On sélectionne d'abord la quantité à diviser :  $I_M(\lambda)_{\text{lissée}}$  (dans notre exemple elle est nommée "Fit.intensité") puis on ouvre le menu "**Opérations/Diviser un spectre par un autre**" et on sélectionne le diviseur  $I_R(\lambda)_{\text{lissée}}$  (nommé ici "Fit.Ref1"). On obtient la courbe nommée pour l'instant "division" (figure 9).



**Fig.9.** Capture d'écran après extraction du continuum de chaque spectre, et division.  
bleu : spectre brut (Intensité)  
violet : spectre de référence (Ref1)  
orangé : spectres lissés (Fit.intensité et Fit.Ref1)  
vert : la réponse instrumentale (Division).

Avant d'aller plus loin, il faut enregistrer notre travail.

**Attention :** la fonction "enregistrer" de VSpec n'enregistre que quatre des spectres présents à

**L'écran :** ceux qui sont respectivement nommés **Intensité, Ref1, Ref2, et Normalisé.**

**Si l'on veut en conserver un autre, il faut d'abord le recopier à la place d'un des quatre précédents.**

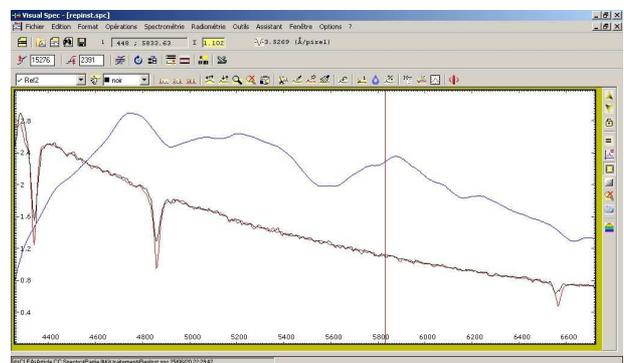
On va donc, avant d'enregistrer, en utilisant la fonction "**Edition/Remplacer**" remplacer le spectre "Ref2" par "Intensité" puis le spectre "Intensité" par "Division" avant d'enregistrer sous "rep\_inst.spc".

Après cette opération, le fichier enregistré contient 3 profils : la réponse instrumentale dans "Intensité", le profil de référence dans "Ref1" et le profil brut dans "Ref2". Les autres profils ont purement été éliminés (figure 10).



**Fig.10.** Fenêtre "Remplace".

Pour finir, nous allons sélectionner le profil brut (contenu dans "Ref2") et le diviser par la réponse instrumentale (contenue dans "Intensité"). En cochant la case "normalise et remplace", le résultat de l'opération viendra remplacer dans "Ref2" le profil brut. Le résultat est donné sur la copie d'écran qui suit : à part du côté des courtes longueurs d'onde, l'accord est plutôt satisfaisant. La différence de profondeur des raies doit pouvoir être attribuée à la trop faible résolution du spectrographe ou à une mise au point pas tout à fait assez soignée : les détails sont "moyennés".



**Fig.11.** La réponse instrumentale (bleu), le spectre de référence (rouge) et le spectre corrigé (noir).

## IV Étalonnage et correction d'autres spectres obtenus au cours de la même nuit

Nous allons maintenant pouvoir exploiter d'autres spectres. Émettons tout de même quelques réserves. Ce qui suit suppose que la "dispersion" et la "réponse instrumentale" n'ont pas varié d'un spectre à l'autre. La première condition est relativement facile à réaliser si l'on prend soin, lors de l'acquisition, de placer à chaque fois l'étoile au même endroit du capteur (pas très aisé tout de même, surtout avec un montage rudimentaire).

Pour s'approcher au mieux de la seconde, il faudrait que l'étoile étudiée et l'étoile qui a servi à obtenir la réponse instrumentale soient assez proches de telle sorte que l'épaisseur d'atmosphère traversée soit la même et que la transparence du ciel n'ait pas trop varié d'une acquisition à l'autre.

Tentons notre chance avec deux étoiles brillantes de la constellation de la Grande Ourse : Alioth et Dubhe.

On charge dans Vspec les spectres découpés d'Alioth (alioth1d\_1200\_1900.fit) et de Véga (vega1d\_1200\_1900.fit).

On sélectionne la fenêtre contenant le spectre d'Alioth et l'on extrait son profil avec la fonction "binning objet", ce qui le met dans "Intensité". On sélectionne ensuite la fenêtre contenant le spectre de Véga et l'on extrait son profil en utilisant la fonction "binning reference", ce qui a pour effet de le mettre dans "Ref1" (figure 12).

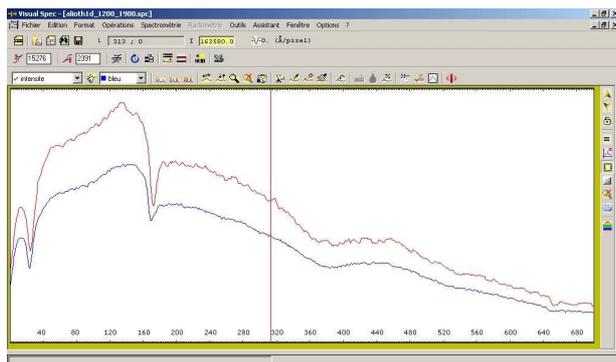


Fig.12. Profils d'Alioth et de Véga.

Première bonne surprise : les profils bruts concordent plutôt bien ! On va donc pouvoir étalonner. La calibration avec 2 raies se fait sur le spectre de Véga, et donne la même dispersion soit 3,53 Å/pixel (figure 13).

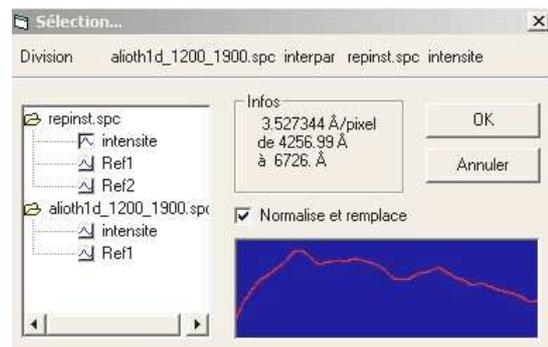


Fig.13. Division des profils.

On va maintenant tenter d'appliquer la réponse instrumentale obtenue avec Véga :

Il faut d'abord, si ce n'est déjà fait, ouvrir le profil correspondant (RepInst.spc) puis afficher la fenêtre contenant le spectre brut d'Alioth (menu "Fenêtre/alioth1d\_1200\_1900.spc"), sélectionner son spectre brut nommé "Intensité" et le diviser par la "réponse instrumentale". Si l'on a sélectionné "normalise et remplace", on obtient le profil corrigé dans "Intensité" (figure 14).

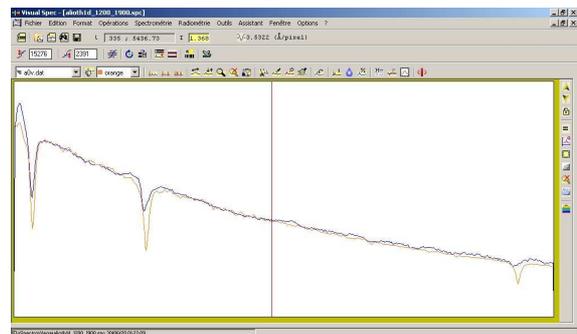


Fig.14. Le spectre d'Alioth corrigé (bleu) et le spectre de la bibliothèque pour une étoile de type A0 V (orangé).

Il ressemble bien au spectre d'une étoile de type A0... pour nous en convaincre allons voir dans la bibliothèque : le type A0 semble bien convenir (on peut tout de même hésiter entre A0 IV et A0 V) ! Vérification : selon Wikipédia Alioth (alias  $\epsilon$  Uma) appartiendrait à la classe A0pCr, soit une étoile de type A0 avec une forte raie du Chrome (figure 16)...

Du coup la tentation est trop forte ! On ouvre le menu "Outils/Elements" pour afficher les raies du chrome et là ... déception ! Pas de creux évident à l'endroit indiqué. Peut-être la résolution est-elle trop faible et la mise au point pas assez soignée sur cette région du spectre.

Tentons une autre expérience sur ce spectre : dans le menu "Radiométrie" il y a une fonction intitulée "auto-Planck". Essayons-la ! Une fenêtre s'ouvre qui nous propose un intervalle de température et un pas de calcul (figure 15).

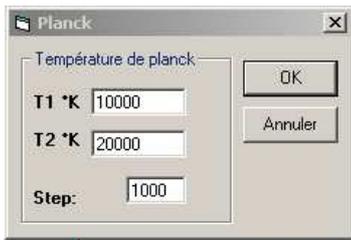


Fig.15. La fenêtre de la fonction "Radiométrie/AutoPlanck".

Le logiciel va tenter de trouver automatiquement la courbe de Planck qui s'ajuste le mieux au profil sélectionné. Résultat : une température effective de 14 000 K. Un peu chaud peut-être ... à vérifier (figure 16).

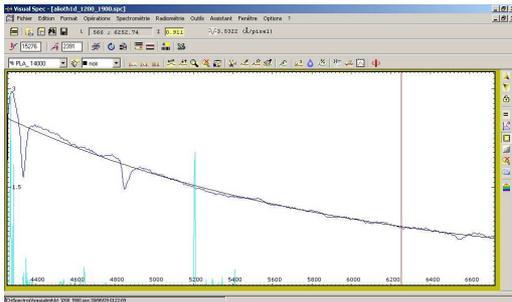


Fig.16. Le profil spectral corrigé, la position des raies du chrome, et le profil de Planck du corps noir à 14 000 K.

Tentons maintenant notre chance avec une étoile un peu moins chaude de la même constellation : Dubhe alias  $\alpha$  Uma. Selon Wikipédia, c'est un système multiple. Quelles surprises va-t-il nous réserver ?

Voici pour commencer le profil brut après étalonnage en longueur d'onde : rien à voir avec les précédents ! On voit déjà qu'il y a beaucoup moins de bleu dans ce spectre ! (figure 17).

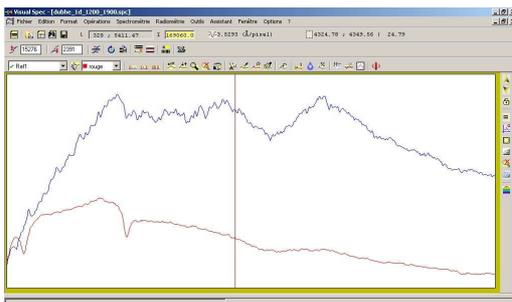


Fig.17. Spectre brut de Dubhe (bleu) et de Véga (rouge). Les échelles sont différentes.

Tentons la correction de la "réponse instrumentale" : manifestement le maximum de luminosité se situe dans l'infrarouge (figure 18) !

Tentons un profil de Planck avec un pas de 250K entre 3 000K et 5 000K. Réponse de Vspec : 4 250K, alors qu'une encyclopédie donne pour la composante principale une température de 4 500 K.

Pas si mal !

Essayons de comparer avec la bibliothèque : la composante principale devrait être de type K0 III. Les profils ne sont manifestement pas superposables, mais il y a des ressemblances plutôt encourageantes (figure 18).

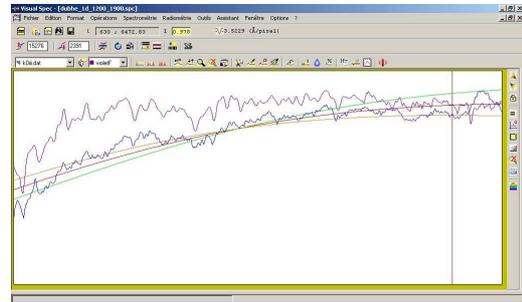


Fig.18. Spectre corrigé (bleu), spectre de la bibliothèque pour la classe K0 III (violet) et profils de Planck à 4000K (vert), 4250K (rouge) et 4500K (orange).

Pour finir, voici le résultat obtenu sur le spectre du gardien de l'ourse, Arcturus alias  $\alpha$  Boo. Une encyclopédie la donne pour une étoile de type K 1,5 III pe, avec une température effective de 4 300K.

La bibliothèque de Vspec permet d'afficher le profil d'une étoile de type K1 III. L'accord est loin d'être parfait, mais il y a tout de même quelques ressemblances.

Si on utilise la fonction "auto-Planck" pour afficher le profil du corps noir qui s'approche le plus, on obtient 4 000K.

Là encore l'accord n'est pas parfait, mais l'ordre de grandeur reste acceptable.

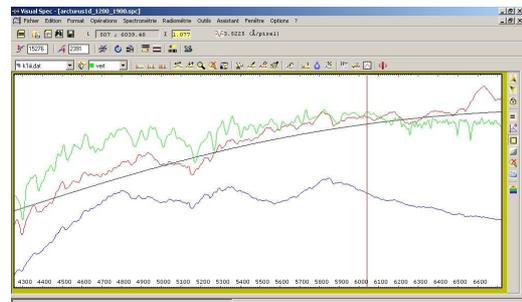


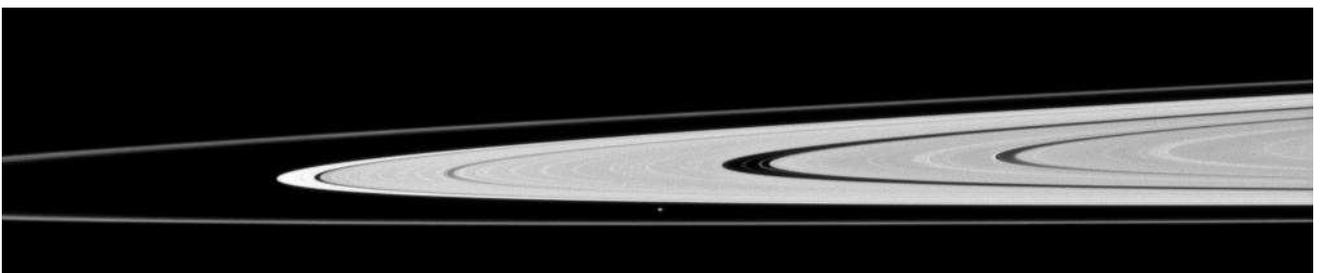
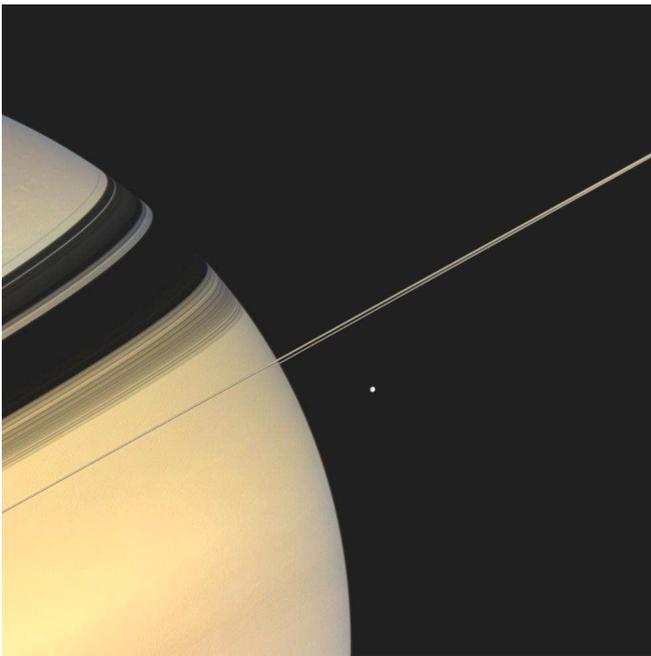
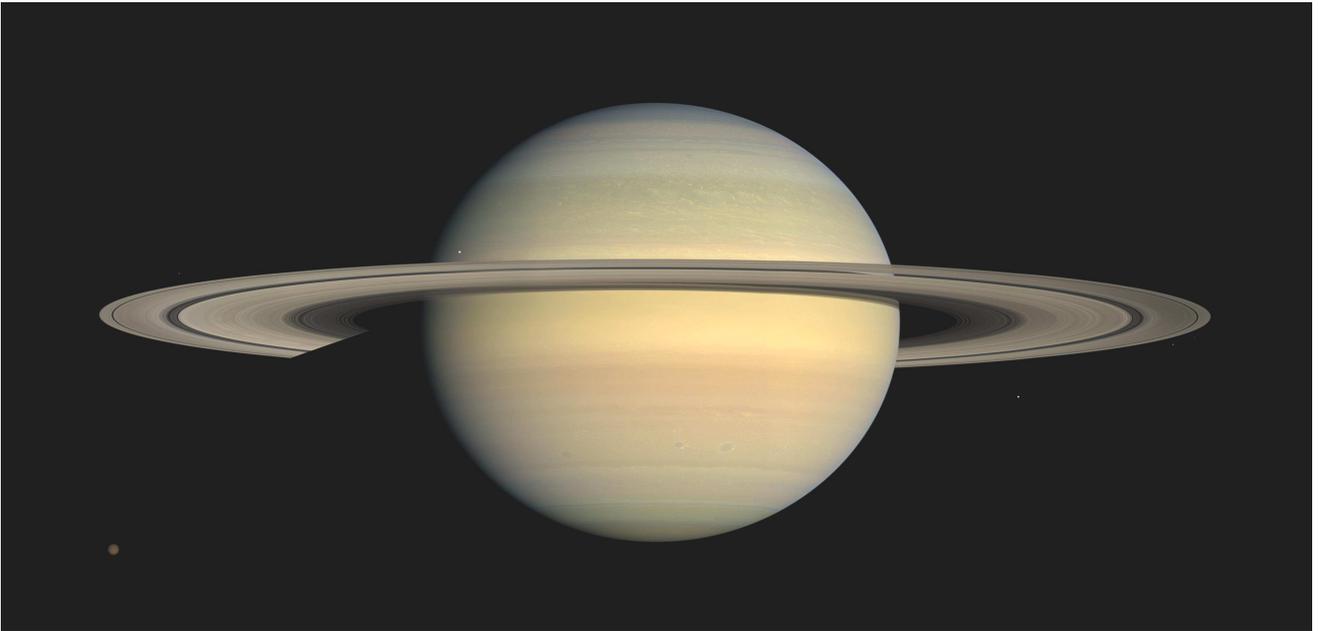
Fig.19. Arcturus : spectre brut (bleu), spectre corrigé (rouge), profil de Planck du corps noir à 4000K (noir) et spectre de la bibliothèque pour une étoile K1 III (vert).

Pour conclure nous dirons que ces premiers résultats ont été obtenus avec un traitement "minimal".

Il doit être assez facile, en soignant un peu plus l'acquisition (mise au point, temps de pose ...) et en soignant bien le montage optique, d'obtenir des profils beaucoup mieux résolus. Juste ce qu'il faut pour avoir envie d'aller un peu plus loin... ■

Jean-Michel Vienney se propose pour répondre à toutes vos questions sur le forum situé à l'adresse : <http://accs.inrp.fr/clea/vieclea/nouvelles-productions/spectrographie/forums>

# THÈME : SATURNE



Crédit photos : JPL NASA

# Saturne, notions de base

Pierre Causeret

## Histoire des découvertes

Visible à l'œil nu, Saturne est connue depuis l'Antiquité. Des 5 planètes visibles, c'est celle qui se déplace le plus lentement sur l'écliptique. Dans la mythologie, Saturne (ou Cronos pour les Grecs) dévore ses enfants pour éviter qu'ils ne montent sur le trône, comme le montre le célèbre tableau de Goya. Il est parfois confondu avec Chronos, le dieu du temps.



*Fig.1. Saturne dans la constellation des Gémeaux, en janvier 2005. Elle se déplace en moyenne de 12° chaque année. On distingue à droite la constellation d'Orion.*

1610. Galilée l'observe avec sa lunette et croit y voir une planète triple à cause de ses anneaux. Deux ans plus tard, surprise, les anneaux ont disparu, ils sont vus par la tranche.

*L'anagramme de Galilée dans une lettre à Kepler :  
« smaisrmilmepoetalevmibunenugttaviras »  
En changeant l'ordre des lettres, on obtient  
« altissimum planetam tergeminum observavi »,  
c'est à dire "J'ai observé que la planète la plus  
élevée est trijumelle".*

1655. Huygens découvre Titan, le principal satellite.

1656. Huygens comprend que Saturne est entouré d'un anneau qui n'adhère pas à la planète.

1675. Cassini découvre une bande sombre dans les anneaux.

1785. Laplace montre qu'un anneau solide serait détruit par les effets de marée.

1793. William Herschel observe la rotation de la planète en 10 h 16 min (à partir d'irrégularités sur les bandes).

1857. Maxwell démontre que les anneaux sont constitués de particules solides indépendantes.

1898. Un spectre montre que la rotation de l'anneau est différentielle (les parties de l'anneau proches de

la planète tournent plus vite que les parties éloignées).

1907. Solà suggère l'existence d'une atmosphère sur Titan.

1944. Découverte de méthane dans l'atmosphère de Titan.

1979. Pioneer 11 est la première sonde à approcher Saturne. Découverte de l'anneau F.

1980. Visite de la sonde Voyager 1. Premières images en haute résolution.

1981. Visite de Voyager 2. Nombreuses images des satellites.

2004. Arrivée de la sonde Cassini-Huygens. Depuis Cassini a accumulé les mesures et les images.

Fin 2004 début 2005. Largage du module Huygens puis atterrissage sur Titan.

## Quelques données

### L'orbite

Demi-grand axe : 1,4 milliards de km (9,5 unités astronomiques).

Période : 29,45 ans.

Période synodique : 1 an et 13 jours (l'opposition de Saturne se décale de 13 jours chaque année).

Vitesse orbitale moyenne : 10 km/s (contre 30 km/s pour la Terre).

Inclinaison du plan de l'orbite sur l'écliptique : 2,5°.

### La planète

Rayon équatorial 60 000 km (9,4 fois la Terre).

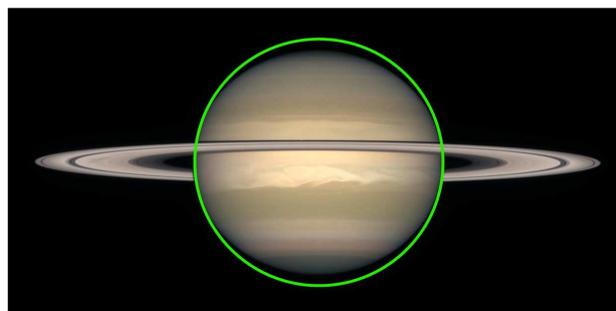
Aplatissement : 10% (le rayon polaire est inférieur de 10% au rayon équatorial).

Masse :  $5,7 \times 10^{26}$  kg (95 × masse de la Terre).

Densité : 0,7 (c'est la moins dense de toutes les planètes).

Inclinaison de l'axe sur son orbite : 26,7°.

Composition : Hydrogène (plus de 93%), Hélium (plus de 5%) + méthane, eau...

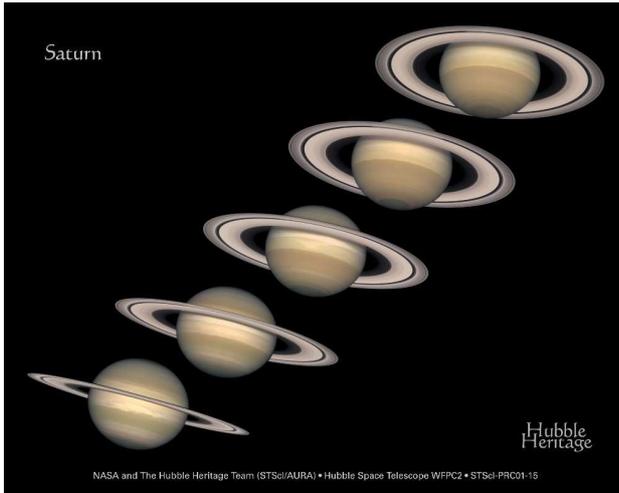


*Fig.2. La planète comparée à une sphère (photo HST).  
L'aplatissement est très visible.*

## Les anneaux

Au cours de leurs découvertes, on a nommé les différentes parties des anneaux de A à G. Seuls les anneaux A et B sont visibles dans un instrument d'amateur. L'anneau B (le plus brillant) mesure de 92 000 à 117 600 km de rayon et l'anneau A de 122 200 à 136 800 km. Entre les deux, on distingue la division sombre de Cassini. Dans l'anneau A, se trouve la division d'Encke, plus difficile à distinguer. L'épaisseur des anneaux est inférieure à 100 m.

Ils sont situés à l'intérieur de la limite de Roche.



**Fig.3.** L'aspect des anneaux varie d'année en année en fonction de la position de Saturne sur son orbite, suivant un cycle de 15 ans. La planète a été photographiée ici par le télescope spatial entre 1996 (en bas) et 2000 (en haut). L'ouverture actuelle des anneaux correspond à la deuxième photo à partir du bas.

## Les satellites

Plus de 60 satellites sont connus actuellement.

Titan (5 150 km de diamètre) est plus gros que Mercure. Il est situé à 1,2 million de km de Saturne. C'est le seul satellite du système solaire à avoir une atmosphère (composée à plus de 98% de d'azote et à moins de 2% de méthane). La pression au sol est de 1 500 hPa (1,5 fois la pression atmosphérique sur Terre !).

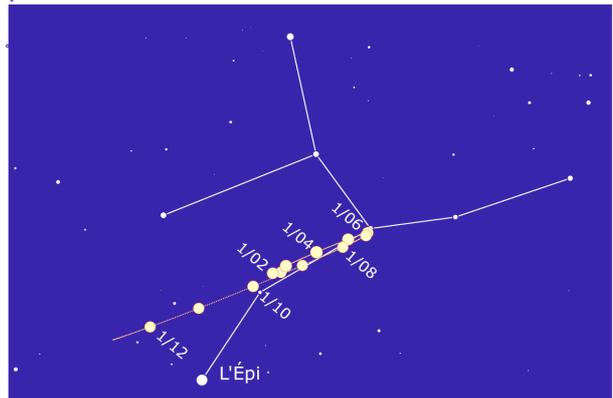
Les autres satellites sont nettement plus petits. On peut citer Rhéa (1 530 km de diamètre), Japet (1 470 km), Dioné (1 120 km), Téthys (1 070 km), Encelade (500 km), Mimas (400 km).

## Saturne en 2011



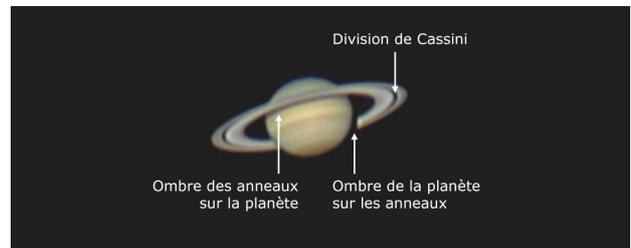
**Fig.4.** Saturne à l'opposition.

Saturne est à l'opposition le 3 avril. Ce jour-là, vue depuis la Terre, la planète est située à l'opposé du Soleil. Elle se lève au coucher du Soleil et se couche au lever du Soleil. Sa distance est alors de 1 288 600 000 000 km. Dans cette configuration, on voit la planète rétrograder car la Terre est en train de la doubler. Sa distance étant importante, sa boucle de rétrogradation est plus petite que celles de Jupiter ou de Mars (figure 5).



**Fig.5.** Saturne dans la constellation de la Vierge en 2011. La planète est représentée en petit chaque jour de l'année et en plus gros le 1er de chaque mois avec un diamètre correspondant à son éclat.

Saturne pourra être observée le soir pendant tout le printemps et au début de l'été. Dans un petit instrument grossissant 20 fois, on commence à distinguer les anneaux. On voit évidemment plus de détails avec un plus fort grossissement : bandes sombres sur la planète, division de Cassini dans les anneaux, ombre des anneaux sur la planète, ombre de la planète sur les anneaux (cette dernière ne peut pas être observée juste au moment de l'opposition).



**Fig.6.** Saturne dans un instrument d'amateur en 2007, un mois après son opposition (photo MM/SAB). En plus des ombres portées et de la division de Cassini, on peut remarquer l'aplatissement de la planète et des bandes de nuages à sa surface.

# ARTICLE DE FOND

## Le système de Saturne, d'un solstice à l'autre

Cécile Ferrari,

*Quelles sont les dernières nouvelles de Cassini-Huygens ? Après un petit tour par Saturne et Titan, Cécile Ferrari nous propose trois énigmes en s'appuyant sur des observations, des hypothèses, des vérifications, en un mot la science en marche.*

### Retour vers Saturne

Saturne défraie la chronique planétaire depuis le XVII<sup>e</sup> siècle. Ses imposants anneaux lui donnent une place à part dans la symbolique collective, Saturne est la réponse à l'injonction "Dessine-moi une planète". Il y a 30 ans, les sondes Pioneer et Voyager ouvraient la route vers Saturne. La sonde CASSINI les a suivies 25 ans plus tard. Ce fut la première mission dédiée à l'exploration du monde saturnien, elle a été mise en orbite autour de la planète en 2004 et finira sa mission en 2017. Elle a d'ores et déjà transformé notre vision de ce petit monde planétaire, cortège de plus de 60 satellites et de nombreux anneaux. À bien y regarder, les scientifiques y ont trouvé surprises, nouveautés mais aussi confirmations de leurs théories et ont résolu quelques énigmes. Un *Cahiers Clairaut* ne suffirait pas à les décrire de manière exhaustive. J'ai choisi trois énigmes qui éclairent, je l'espère, la démarche scientifique d'investigation, celle de Phœbé et Japet, celle d'Encelade et de l'anneau E et celle des hélices dans les anneaux.

### Les saisons de Saturne

La planète Saturne met environ 29 ans et demi pour accomplir une révolution autour du Soleil. Son axe de rotation, de direction constante par rapport aux étoiles, est incliné de  $26,7^\circ$  par rapport à la perpendiculaire au plan de son orbite héliocentrique. Tout comme la Terre, Saturne et son système subissent des saisons, rythmées par l'inclinaison apparente du Soleil au lieu où l'on se trouve. C'est Huygens qui en fit le premier la description limpide au XVII<sup>e</sup> siècle en expliquant l'aspect changeant de Saturne dans le ciel. L'élévation du Soleil sur le plan des anneaux (qui est aussi le plan équatorial de Saturne) varie donc de  $-26,7^\circ$  à  $+26,7^\circ$  entre l'été austral et l'été boréal séparés d'un peu moins de 15 ans. À

l'équinoxe, le Soleil est dans le plan de l'équateur de Saturne (et la Terre est proche de ce plan) et les anneaux disparaissent de notre vue. Les satellites reçoivent aussi le rayonnement solaire préférentiellement sur leur hémisphère nord ou sud suivant les saisons et le point le plus chaud de leur surface avoisine celui où le Soleil est à la verticale. Les atmosphères de Saturne et de Titan sont aussi sensibles aux saisons. L'impact saisonnier sur la température observée des anneaux est certain.

### La sonde Cassini, une machine à explorer

Rappelons-le, la sonde Cassini-Huygens est le plus gros engin d'exploration jamais lancé dans le système solaire extérieur. Six tonnes, douze instruments scientifiques dont cinq couvrant l'essentiel du spectre électromagnétique de l'ultraviolet au rayonnement radio. Sa trajectoire a été conçue pour assurer la plus grande diversité de points de vue sur les objets et l'exploration la plus exhaustive possible. C'est une trajectoire en pétales, faite d'ellipses dont le périastre et l'inclinaison varient au cours des ans. Elle est optimisée pour satisfaire au mieux les objectifs scientifiques poursuivis par les équipes scientifiques de chaque instrument embarqué.

### Les nouveaux visages des Titans et des Géants

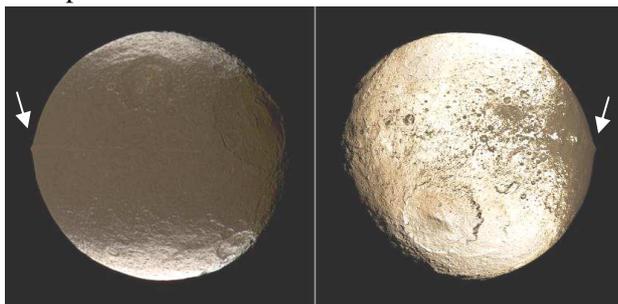
#### Titan

L'événement phare de la mission Cassini restera le largage de la sonde Huygens dans l'atmosphère de Titan avec cette caméra de descente qui va nous donner les premières images sous parachute des paysages titaniens. Images infrarouges et balayage radar vont finir par nous dévoiler un cycle

climatique installé, des rivières, des lacs et des dunes. Une question essentielle reste posée parmi tant d'autres : pourquoi et comment Titan garde-t-il une atmosphère azotée si épaisse malgré la photodissociation des molécules par les rayons ultraviolets du Soleil ? Y a-t-il un volcanisme sur Titan apte à dégazer et à l'entretenir ainsi ? Les taches sombres dans lesquelles débouchent les rivières sont-elles vraiment des lacs ? Quelle est leur composition chimique ? Est-ce du liquide ? Les caméras observant dans le domaine visible ont du mal à percer cette atmosphère épaisse. Le proche infrarouge passe et c'est le spectromètre VIMS qui peut nous donner une image de la surface. Le radar qui peut lui aussi percer l'atmosphère, à force de balayage de la surface au fil des années, nous décrit à une résolution unique d'une centaine de mètres, l'altitude et la rugosité de la surface à force de balayage de la surface au fil des années... .... Un monde à part entière et un article qui s'y consacre.

### Phœbé et Japet, l'histoire d'une question résolue

Japet, un des plus gros satellites de Saturne (1 400 km de diamètre), a créé la surprise par la découverte en décembre 2004 d'un bourrelet équatorial de plus de 1 000 km de long et 13 km d'altitude dont on cherche l'origine et pour lequel plusieurs hypothèses sont émises : poussées endogènes aptes à créer des montagnes ou bien l'existence d'un autre satellite, brisé par les effets de marée de ce gros satellite qu'est Japet et dont les débris auraient heurté la surface. Mais l'énigme n'est pas là.



**Fig.1.** Image de la face "avant" de Japet (à gauche) qui apparaît très sombre comparée à la face "arrière" (à droite) relativement à la direction du mouvement orbital. Cette région très sombre couvre environ 40% de la surface et s'appelle Cassini Regio. On voit clairement sur ces deux images le bourrelet équatorial (flèches).

On sait aussi que Japet a une face sombre, celle orientée dans la direction du mouvement orbital, tel un pare-brise face à la route. En effet Japet est synchrone, il fait un tour sur lui-même dans le même temps qu'il effectue une révolution autour de

Saturne. De ce fait, c'est toujours la même face qui ouvre la route. Corrélation étrange entre cette exposition privilégiée et cette couleur sombre. La question est posée : d'où vient cette dichotomie ? Endogène ? Un cryo-volcanisme tendant à recouvrir la surface d'un matériau sombre ? Exogène ? Une pollution venue d'ailleurs ? La réponse viendra de Phœbé.

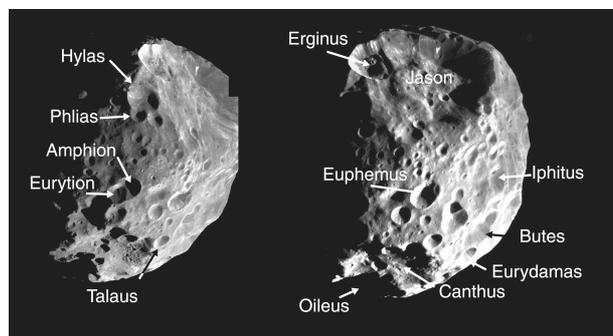
Là-haut dans le ciel de Japet, navigue Phœbé, éloigné de quelques millions de kilomètres. Phœbé est un petit satellite de Saturne de 200 km de diamètre, chef de file d'une quarantaine de petits satellites irréguliers, pour la plupart de taille inférieure à 10 km, découverts de la Terre dans les années 2000. Ils sont irréguliers parce qu'ils sont petits, très distants de Saturne et tournent souvent dans le sens inverse de la rotation de la planète sur elle-même. On les croit venus d'ailleurs, capturés par Saturne.

Car, au-delà de ses éléments orbitaux particuliers, Phœbé affiche un sombre détonant dans la famille des satellites glacés brillants. Il reflète moins de 10% de la lumière solaire, au lieu du minimum réglementaire de 50%, au même niveau que la face sombre de Japet.

L'hypothèse jaillit d'un lien "chimique" entre les deux, bien avant l'arrivée de la sonde Cassini. Encore faut-il le démontrer ? Et comprendre comment ?

La sonde survole Phœbé à son entrée dans le système saturnien en juin 2004. Elle en fait pour la première fois des spectres avec le spectro-imageur VIMS, en mesurant la quantité de lumière solaire réfléchiée en fonction de la longueur d'onde entre 0,3 et 5  $\mu\text{m}$ .

Les mêmes mesures sont effectuées sur Japet en décembre 2004. L'allure des spectres est étonnamment semblable.



**Fig.2.** Deux images du satellite Phœbé prises par la sonde Voyager2 en juin 2004 ; c'est un corps très sombre qui réfléchit moins de 10% de la lumière qu'il reçoit. Son diamètre est d'environ 200 km. Vingt-quatre cratères ont été nommés du nom des Argonautes.

La pollution est bien exogène, de Phœbé vers Japet, encore faut-il décrire comment elle se déroule, et vérifier la vraisemblance des hypothèses.

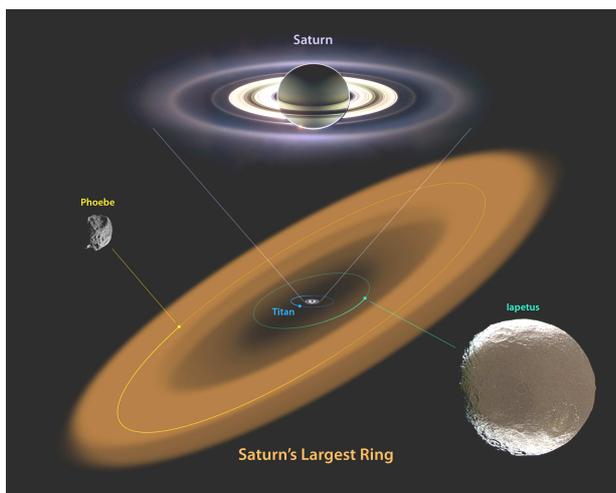
Et c'est le télescope Spitzer, observateur infrarouge en orbite autour de la Terre, qui va répondre à la question en octobre 2009. Observant dans le domaine infrarouge thermique, à 24  $\mu\text{m}$ , là où les poussières sombres et donc chaudes émettent un rayonnement infrarouge suffisant pour être détecté, il va scruter le système de Saturne.

Des scientifiques bien avertis savent qu'un satellite peut relâcher moult poussières dans l'espace sous l'effet du bombardement météoritique (qui a lieu chez nous comme ailleurs mais qui laboure les surfaces sans atmosphère).

Phœbé ne perdrait-il pas ainsi de sa matière sombre dans un vaste anneau de poussière, matière qui tomberait doucement en trajectoire spirale vers Saturne, sous l'effet de forces dissipatives d'énergie, ... un nuage dans lequel Japet, en orbite inférieure, passerait et collecterait d'innombrables échantillons.

Il s'agit donc de répondre à la question spécifique de savoir s'il y a un anneau de poussières entre Phœbé et Japet, très peu dense sans doute, et donc difficile à détecter... Les poussières sont sombres, donc chaudes (détectables par Spitzer en infrarouge).

Si on regarde cet anneau de poussières par la tranche, son épaisseur apparente va augmenter et la section efficace remplie par les poussières aussi. Spitzer a réussi à détecter l'anneau de Phœbé dans le même plan d'orbite que le satellite, preuve de son lien dynamique avec Phœbé. Et l'anneau s'étend bien jusqu'à l'orbite de Japet. Trente ans donc pour répondre avec certitude à la question.

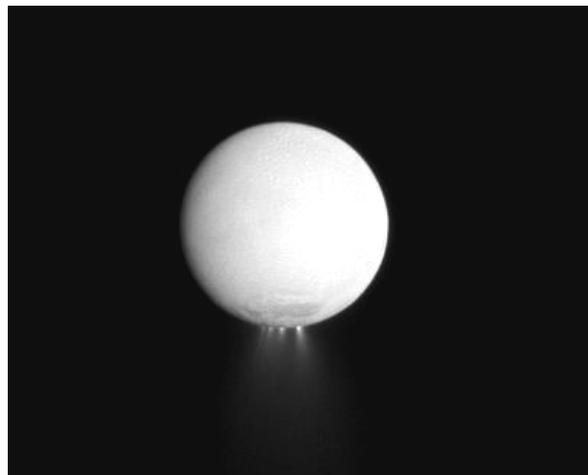


**Fig.3.** Schéma descriptif des orbites relatives des satellites Japet et Phœbé et de la structure du nouvel anneau découvert.

## Encelade et l'anneau E, une activité surprenante

L'anneau E est un anneau diffus très étendu autour de Saturne, à des distances comprises entre 3 et 8 rayons saturniens. Il a été découvert en 1980 dans des conditions d'observations similaires à celui de Phœbé, depuis un télescope terrestre, au moment où la Terre passait dans le plan des anneaux de Saturne et les voyait par la tranche, une technique éprouvée pour la détection d'anneaux ténus...

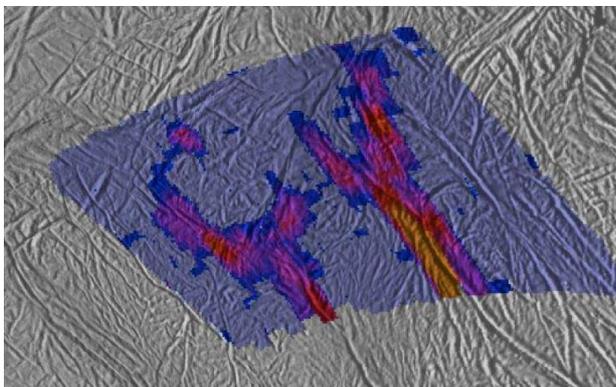
Apparaissant beaucoup plus dense au niveau de l'orbite d'Encelade, l'hypothèse la plus probable pour l'origine de cet anneau semble être celle d'un Encelade géniteur. Par quel processus ? Bombardement météoritique qui laboure la surface et éjecte de la poussière dans l'espace ? Mais pourquoi lui, le petit satellite de 500 km, plutôt que Téthys, Dioné ou Rhéa, au moins 2 fois plus gros et qui baignent aussi dedans ? Première anomalie lors d'un survol d'Encelade : sa cartographie thermique montre un point chaud au pôle Sud du satellite au lieu d'être situé au voisinage du point sub-solaire où le Soleil est au zénith. Ce point chaud se trouve dans la région des Griffes du Tigre, au sud, région traversée par de grandes fissures. Il faut noter que la surface d'Encelade, satellite recouvert de glace d'eau, n'exhibe dans certaines régions, dont celle-là, que très peu de cratères d'impact, signe que la surface a fortement évolué depuis quelques milliards d'années.



**Fig.4.** Cette image montre l'hémisphère d'Encelade éclairée par Saturne seulement. Les quatre jets sont vus grâce à la lumière du Soleil qu'ils diffusent, le Soleil étant caché derrière Encelade. C'est la meilleure manière pour détecter des poussières micrométriques. L'image a été prise en décembre 2009.

Les caméras sont reprogrammées et découvrent en 2005 des jets de glace et de poussière qui

s'échappent d'Encelade jusqu'à des altitudes comparables à la taille du satellite. Cette activité est complètement inattendue pour un satellite si petit. D'où vient son énergie ? ! La dissipation d'énergie par friction due à des effets de marée n'est apparemment pas suffisante pour provoquer cette activité. On croyait aussi le satellite trop petit pour avoir une réserve d'énergie radioactive apte à faire fondre la glace en souterrain, qui sous pression pourrait être expulsée sous forme de jets. Le spectromètre infrarouge CIRS est repointé sur les failles au cours de passage à basse altitude et montre qu'elles sont bien plus chaudes que les alentours. Les images de plus en plus précises ont été faites jusqu'à très récemment (février 2011) et permettent maintenant d'en donner les dimensions. Mais l'énigme de la source d'énergie apte à alimenter une telle évolution géologique sur un corps si petit n'est toujours pas résolue. Quel est le moteur d'évolution de ce petit corps glacé ? L'analyse des poussières montre qu'il y a des sels de sodium et de potassium ainsi que des carbonates dans les jets tendant à prouver l'existence d'un océan liquide entre la croûte de glace et un noyau central rocheux dont les minéraux se dissoudraient dans l'océan. Il y aurait donc peut-être suffisamment de roches pour que la radioactivité fasse son office.

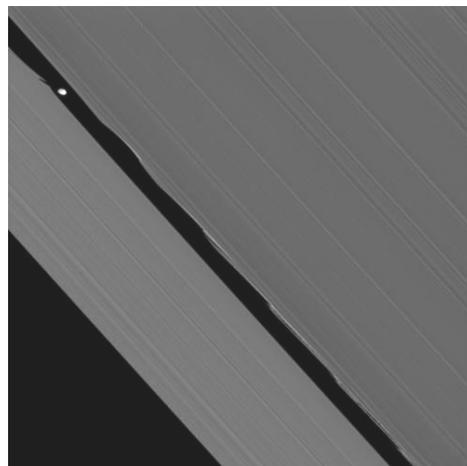


*Fig.5. Failles d'Encelade – Carte d'émission thermique des failles d'Encelade dans la région sud des Griffes du Tigre faite par le spectromètre infrarouge CIRS embarqué sur la sonde Cassini. La couleur orange correspond aux flux les plus importants mesurés entre 11 et 16  $\mu\text{m}$  de longueur d'onde et donc à des températures plus importantes. Les jets prennent leur source dans ces failles.*

### Hélices dans les anneaux

Le lien de parenté entre anneaux et satellites n'est pas encore clair...qui de la poule et de l'œuf?...Les anneaux ont-ils été formés à partir d'un satellite qui s'est fragmenté dans la limite de Roche de Saturne sous les effets de marée ou bien

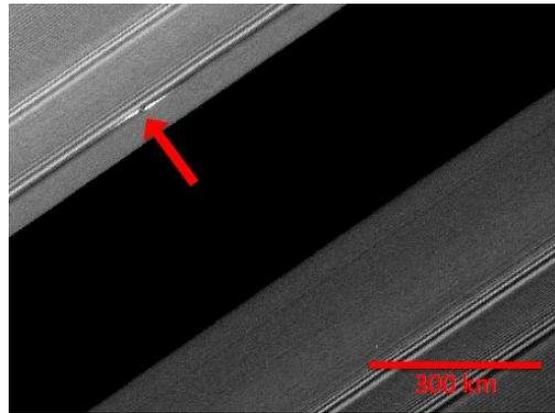
les anneaux sont-ils un satellite qui n'a pu s'agglomérer à partir d'un disque de particules ? Certains avancent maintenant aussi que les petits satellites au voisinage des anneaux se sont formés à partir de particules des anneaux, qui se seraient étendus au delà de la limite de Roche. On constate que de petites lunes kilométriques peuvent survivre aux effets de marée à l'intérieur de la limite de Roche, telles Pan (13 km) et Daphnis (5 km) dans les divisions d'Encke et de Keeler. Celles-ci sont-elles des satellites formés plus loin et ayant migré vers l'intérieur des anneaux ou sont-elles les particules les plus grosses des anneaux de Saturne ? Il nous manquait jusqu'à récemment un maillon dans la distribution des tailles entre les particules des anneaux, de taille comprise entre le centimètre et quelques mètres et ces petites lunes. Le manque d'objets de quelques dizaines à quelques centaines de mètres de taille posait question : s'ils n'existent pas, quel processus empêche leur formation sans altérer la formation de corps plus gros ? S'ils existent, pourquoi n'ont-ils pas été détectés ? S'ils sont le produit d'une fragmentation de corps plus gros, pourquoi ne les voit-on pas ? Il faut noter à ce point que les lunes kilométriques étaient à la limite des possibilités de détection des sondes Voyager, les dernières à être passées dans les environs en 1980 et 1981.



*Fig.6. Daphnis dans la division de Keeler.*

La réponse est venue très tôt, en 2004 au moment où la sonde Cassini a été mise en orbite autour de Saturne et s'est confirmée tout au long de la mission initiale jusqu'en 2008. Au moment de sa capture par la planète, le 1<sup>er</sup> juillet 2004, la sonde a frôlé les anneaux à 20 000 km d'altitude, autorisant une résolution de 50 mètres dans l'anneau A de Saturne le plus extérieur, celui dans lequel naviguent **Pan** et **Daphnis** et où les effets de marée sont plus réduits. Ces images ont permis de détecter quelques traces étranges comme des sillons

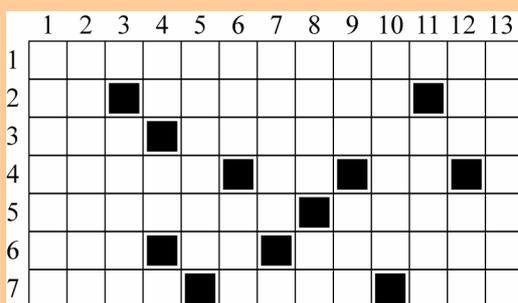
entrouverts dans l'anneau, très effilées et allongées qu'on a appelé les "hélices". On leur a donné d'ailleurs plus tard (une fois leur caractère éphémère définitivement rejeté) les noms de célèbres pilotes pionniers de l'aviation. On disposait alors de nombreux modèles dynamiques d'interaction entre anneau et satellites nichés dans les anneaux, ce qui a permis de montrer que les formes observées étaient tout à fait compatibles avec l'image que donneraient des petites lunes de quelques dizaines à centaines de mètres qui balayeraient sur leur passage les particules du disque ouvrant ainsi un vide, qui se reboucherait tout de suite après leur passage, expliquant ainsi la forme d'hélice. Seules des lunes d'un kilomètre au moins peuvent ouvrir une division de l'anneau. La dimension de ces structures permet d'estimer la masse et donc la taille de l'objet au centre. La taille des premières découvertes s'échelonnait entre 40 m et 120 m. D'autres ont été découvertes plus tard avec le même ordre de grandeur en taille. Il semble même qu'elles soient distribuées en ceintures de petites lunes au sein de l'anneau A, la plus dense étant centrée à 129 000 km de la planète. On en compte plus de 150 maintenant ! Leur nombre sur une surface donnée permet d'estimer leur nombre total dans les anneaux. Ces nouveaux objets assurent dorénavant une continuité parfaite dans la distribution des tailles des particules. On les pense plutôt en phase d'agglomération dans la banlieue de Saturne, côtoyant d'autres structures, éphémères, trains de particules qui se forment par attraction gravitationnelle mutuelle des particules, les "wakes".



*Fig.7. Une "hélice" (propeller en anglais), située aux abords de la division d'Encke dans l'anneau A de Saturne. La lune à l'origine de cette structure a environ un kilomètre de diamètre. L'hélice fait 5 km de large et 60 km de long. Elle porte le nom de Earhart, en mémoire de l'aviatrice américaine Amélia Earhart.*

La mission Cassini est une source inépuisable d'histoires de science et d'investigation. La connaissance avance sur des échelles de temps intergénérationnelles, essentiellement grâce au progrès technique, à la transmission du savoir et des questions en suspens, dans une alternance entre observations, élaborations d'hypothèses, tests d'hypothèses et de modèles, théorie analytique ou simulations numériques, et enfin confrontations à de nouvelles données. La complémentarité entre l'exploration spatiale et l'observation depuis les télescopes terrestres n'est plus à démontrer. Tâchons d'inspirer nos élèves, de les rendre curieux et de former les plus désireux à poursuivre cette aventure. ■

## Mots croisés spécial Saturne



### Verticalement

- Spécialités de Saturne.
- Elle fut la première à voir Saturne de près.
- Exclama.
- Métal précieux. Anéanti.
- Grand pour Cassini ou Huygens.
- Surnom. Un des composants les plus importants de Titan.
- Ses massacres firent plusieurs milliers de morts en 1945.
- Gras. Les deux anneaux visibles dans un instrument d'amateur.

### Horizontalement

- Celui de Saturne est le plus important du système solaire.
- On en trouve dans les sidérites. Comme Saturne. Moins de 9 pour Saturne en ce moment.
- Son vaisseau n'était pas spatial. Les vitesses des vents sur Saturne dépendent d'elles.
- Sa division est connue sur Saturne et pourtant c'est Keeler qui l'aurait découverte. Conifère. Initiales à la mode en sciences physiques.
- Il ne permet pas de voyager jusqu'à Saturne. Grand observateur des anneaux de Saturne.
- Bout de recueil. Possessif. Proscrite.
- Entre gamma et UV. Du raisin. Lentille.
- Direction du lever de Saturne. Cerveau spatial en 2001.
- On y trouve des spécialistes de Saturne.
- Satellite de Saturne.
- Il y en a plus d'une sur Saturne. Le vrai se fait avec de l'aligoté.
- Pressées

*Pierre Causeret*

## Titan

**Vincent Boudon (Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne – UMR 5209 CNRS - Université de Bourgogne, et Société Astronomique de Bourgogne).\***

*En orbite autour de la célèbre planète aux anneaux, Saturne, se trouve un monde fascinant : Titan. Perpétuellement cachée derrière une épaisse brume orangée, la surface de ce satellite glacé aux dimensions planétaires nous est longtemps restée inconnue. Elle nous est aujourd'hui révélée en détail par la mission américano-européenne Cassini-Huygens. Celle-ci nous emmène à la découverte d'un astre étrange, avec ses lacs et ses rivières d'hydrocarbures, ses dunes de glace et ses reliefs karstiques à -190 °C. Elle nous révèle aussi une chimie organique complexe et étonnante, qui pourrait bien nous en apprendre plus sur l'origine de notre propre planète et, qui sait, de la vie.*

### De Huygens à Cassini-Huygens

Le 25 mars 1655, l'astronome et mathématicien hollandais Christiaan Huygens, observant Saturne à l'aide d'une lunette, remarque "près de lui à l'occident une petite étoile, éloignée d'environ trois minutes". Observant son mouvement les nuits suivantes, il se persuade qu'il s'agit bien d'une nouvelle observation d'une lune autour d'une autre planète, quarante-cinq ans après la découverte par Galilée des quatre principaux satellites de Jupiter. Pendant plus de deux cent cinquante ans, le plus gros satellite de la planète aux anneaux, qui fut nommé Titan par John Herschel en 1847, reste un petit point dans les télescopes. Seule son orbite est connue. On sait aussi qu'il est gros, mais sa taille réelle reste débattue.

L'intérêt pour Titan s'éveille au début du XXe siècle. En 1907, l'astronome canadien Joseph Comas Solà déclare observer un assombrissement du bord du disque de Titan, ce qui pourrait révéler la présence d'une atmosphère. Cette intuition s'avèrera juste. En effet, en 1944, l'astronome néerlandais Gerard Kuiper enregistre un spectre de Titan et y détecte la présence de méthane (CH<sub>4</sub>), quatre ans avant l'identification de cette même molécule par spectroscopie par Marcel Migeotte dans l'atmosphère de ... la Terre ! (*l'identification de ce gaz avait été faite en 1777 par Alessandro Volta*).

C'est l'avènement des sondes spatiales, à partir de la fin des années 1970, qui va permettre de révéler un monde fascinant, siège d'une chimie organique très riche. À tel point qu'une mission spatiale va lui

\* Vincent Boudon travaille sur l'atmosphère de Titan et en particulier sur la modélisation du spectre du méthane.

être en grande partie consacrée.

Titan est un astre aux dimensions planétaires. Avec un diamètre de 5 150 km, il est le second satellite du système solaire par la taille juste après Ganymède, satellite de Jupiter. Il est plus gros que la planète Mercure et un peu plus petit que la planète Mars. Sa densité faible (1,88) révèle un corps composé majoritairement de glace d'eau. Mais l'intérêt principal de Titan vient de son épaisse atmosphère. Avec une pression au sol de 1,5 bar, elle est majoritairement composée de diazote (N<sub>2</sub>), avec quelques pour cent de méthane et des traces de nombreuses molécules organiques.

### La révolution par les robots

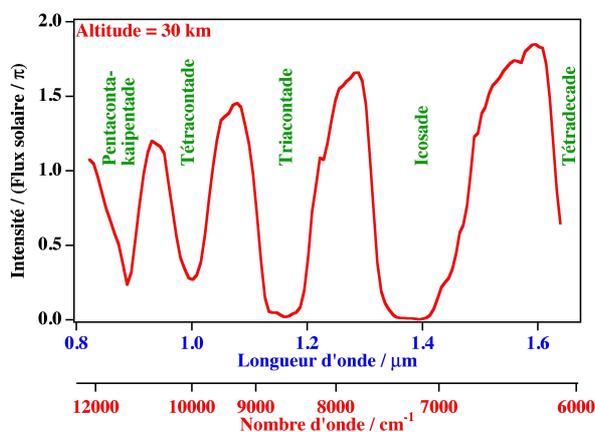
Le premier engin à survoler Titan fut la sonde américaine *Pioneer 11*, en septembre 1979. Cette petite sonde fut redirigée vers Saturne après un survol de Jupiter. Un bonus, en quelque sorte. Ses caméras étaient cependant rudimentaires et elle ne vit de Titan qu'un petit globe orangé et flou. Arrivée seulement un an plus tard (en novembre 1980), la sonde *Voyager 1*, elle aussi américaine et beaucoup plus sophistiquée, avait pour mission d'étudier Titan de très près, ce satellite étant, du fait de son atmosphère, déjà pressenti comme très intéressant.

Cependant, les images prises lors du survol à moins de 7 000 km de distance ne montrent qu'une atmosphère emplie d'une brume orange impénétrable, ne révélant rien de la surface<sup>1</sup>. La

<sup>1</sup> Rien ? Pas tout à fait ... Mais ce n'est qu'en 2004 qu'un traitement d'images intensif révéla que les images de *Voyager 1* permettaient de distinguer quelques grandes structures à la surface de Titan (voir le site : <http://www.astro.cornell.edu/~richardson/vgertitan.html>).

sonde jumelle *Voyager 2* suit de près en août 1981 mais, en route pour Uranus et Neptune, elle survole Titan de plus loin. Si les images des *Voyager* furent quelque peu décevantes, les nombreuses données recueillies, en particulier spectroscopiques, ne firent qu'accroître l'intérêt pour Titan. Que se cache-il sous cette brume orangée ? Quels processus chimiques complexes y sont-ils à l'œuvre ? Un océan d'hydrocarbures recouvre-il la surface de cette lune ?

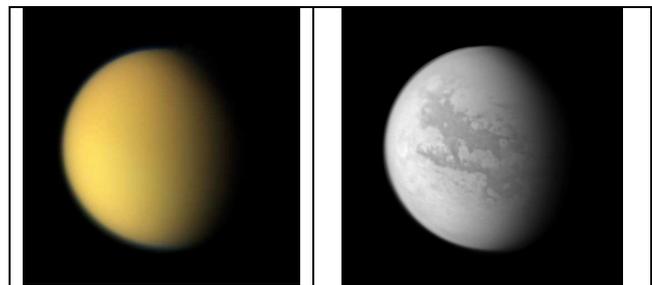
Au cours des années 1990, le Télescope Spatial Hubble, puis les plus grands télescopes terrestres utilisant l'optique adaptative, purent, en observant dans l'infrarouge, percer l'atmosphère de Titan et révéler quelques détails, ainsi que nous le verrons plus loin.



**Fig.1.** Spectre enregistré depuis une altitude de 30 km par la sonde Huygens lors de sa descente dans l'atmosphère de Titan, le 14 janvier 2005 (l'instrument regardant le Soleil). On voit clairement les fortes bandes d'absorption du méthane (dont les noms sont donnés en vert).

Mais le point d'orgue de l'exploration de Titan reste la mission américano-européenne Cassini-Huygens, sans doute la mission robotique interplanétaire la plus ambitieuse et la plus complexe jamais réalisée. Le projet remonte à 1982. Suite aux résultats de *Voyager 1*, la NASA décide de retourner vers Saturne et Titan, avec un orbiteur et un atterrisseur. L'Agence Spatiale Européenne, l'ESA, s'associe dès le début au projet. Après bien des péripéties, la construction débute en 1994. Cassini-Huygens est le plus gros vaisseau (5 712 kg au lancement) jamais envoyé vers le système solaire externe (au-delà de Mars). Il est lancé le 15 octobre 1997 de Cap Canaveral par une fusée Titan IVB/Centaur. Comme il est impossible d'envoyer directement vers Saturne une sonde aussi lourde, Cassini-Huygens emprunte une trajectoire complexe, lui faisant survoler successivement Vénus par deux fois, puis la Terre

et Jupiter<sup>2</sup>, avant d'arriver enfin vers Saturne autour de laquelle elle se satellisa le 1<sup>er</sup> juillet 2004. Le jour de Noël de la même année, l'atterrisseur européen Huygens est largué. Il plonge dans l'atmosphère de Titan le 14 janvier 2005. Après une descente en parachute de près de 2 h 30, l'engin se pose sur le sol glacé de la plus grosse lune de Saturne. Il y collectera des données pendant encore plus de deux heures. Cet immense exploit technologique constitue l'atterrissage le plus lointain jamais réalisé. Après la Lune, Vénus, Mars et l'astéroïde Éros, Titan est le cinquième objet du Système Solaire à voir une sonde se poser en douceur sur son sol. L'orbiteur, quant à lui, poursuit sa mission, décrivant des orbites autour de Saturne et survolant régulièrement Titan.



**Fig.2.** À gauche, vue de Titan en lumière visible, montrant l'atmosphère et sa brume organique orangée. À droite, vue infrarouge à 638 nm, révélant la topographie du sol. En effet, comme on peut le voir sur la figure 1, le méthane est relativement transparent dans cette région spectrale (Images JPL PIA06230 et PIA06228 – Crédit photo : NASA/JPL/Space Science Institute).

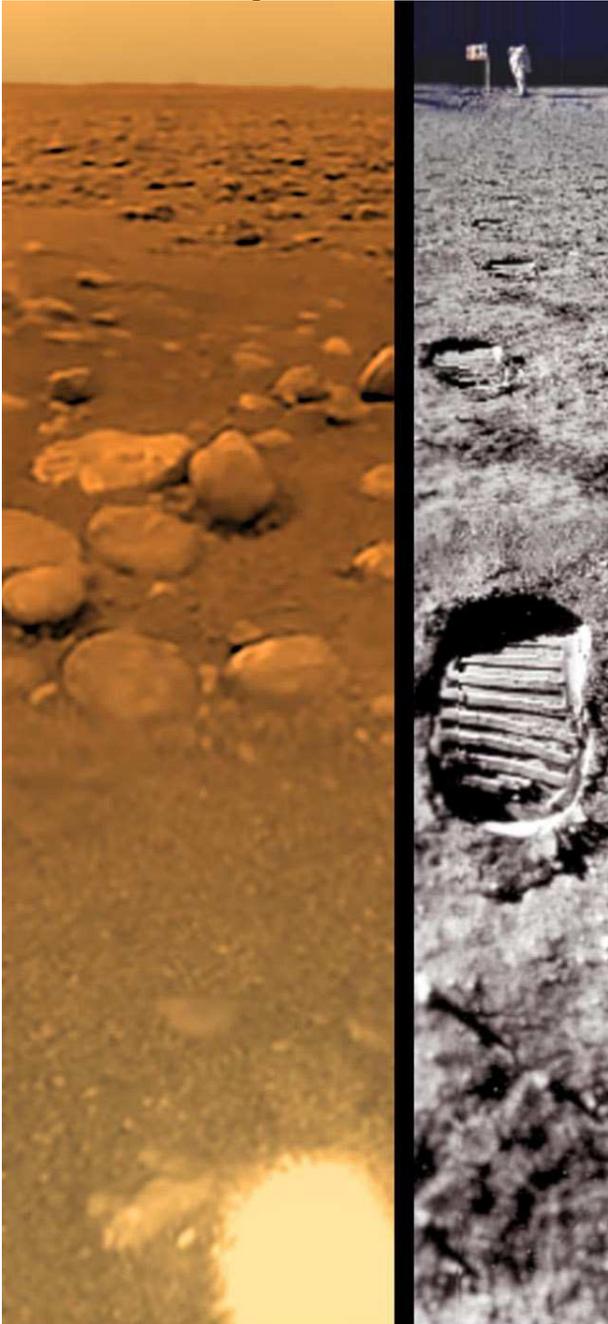
## Percer la brume

Si le grand intérêt de Titan réside dans son épaisse atmosphère, l'épaisse brume orangée qui l'emplit constitue un obstacle pour l'étude du sol, totalement masqué. Un moyen pour étudier celui-ci consiste à poser un engin comme Huygens au sol, nous y reviendrons. Cela dit, une étude globale du satellite (Huygens s'est posée à un endroit particulier), nécessite de trouver des moyens d'étude à distance.

Un premier moyen consiste à observer Titan dans l'infrarouge. Ce rayonnement, en effet, est peu arrêté par la brume, contrairement à la lumière visible. Un second obstacle survient cependant : le méthane. Cette molécule présente de fortes bandes d'absorption dans tout l'infrarouge, ne laissant que d'étroites fenêtres de transparence. Ceci est dû à la

<sup>2</sup> Chaque passage vers une planète, selon une géométrie particulière, sert à accélérer la sonde, afin de la propulser vers son objectif suivant. C'est la technique de l'assistance gravitationnelle, aujourd'hui largement utilisée pour l'envoi de sondes vers des objectifs lointains.

structure complexe de ses niveaux d'énergie, comme l'illustre la figure 1.



**Fig.3.** À gauche : image du sol de Titan prise par l'instrument DISR de la sonde Huygens le 14 janvier 2005. La vue de droite montre la surface lunaire prise lors d'une mission Apollo, à la même échelle (Image JPL PIA08115 – Crédit photo : NASA/JPL/Space Science Institute).

Le Télescope Spatial Hubble (suivi plus tard par de grands observatoires au sol, comme le télescope Keck à Hawaii), fut le premier à exploiter ces fenêtres dès 1994, dévoilant de grandes structures à la surface dont en particulier une grande région brillante, aujourd'hui dénommée *Xanadu*. Depuis 2004, la sonde Cassini a pris de très nombreux

clichés infrarouges de Titan, révélant une topographie complexe (figure 2).

Enfin, l'autre moyen de percer la brume titaniennne, consiste à utiliser la technique radar. Lors de certains survols, la sonde Cassini utilise sa grande antenne parabolique, afin d'obtenir des images radar de la surface. Cette technique nécessite toutefois des survols rapprochés.

## Étranges paysages

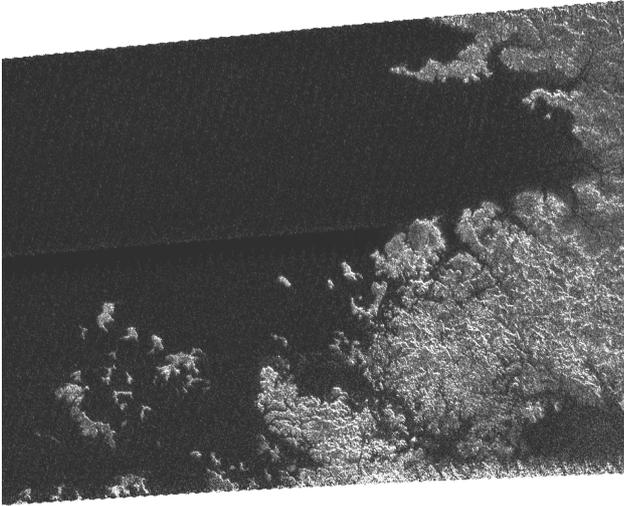
Après plus de six ans d'observations par Cassini-Huygens, c'est un étonnant portrait d'un monde bien étrange qui nous est donc révélé petit à petit.

Titan est tout d'abord un monde de glace. Il n'y a pas de silicates à sa surface mais, à  $-190^{\circ}\text{C}$ , la glace d'eau qui la constitue joue le rôle de roche. On trouve ainsi des collines, des montagnes, des vallées, des failles et de nombreux reliefs d'apparence tectonique. Le paysage révélé au sol par la sonde Huygens montre une plaine constellée de "galets" qui sont en fait des morceaux de glace (figure 3).

La surface de Titan montre très peu de cratères d'impact ; elle apparaît donc très jeune et doit être remodelée régulièrement par des processus géologiques. Un certain nombre de formations remarquables sont à noter :

- De grands champs de dunes, vraisemblablement constituées d'un "sable" fait de fines particules de glace. La distribution et l'orientation des dunes ont même permis de dresser la carte des vents dominants ;
- Des escarpements parallèles, d'origine tectonique ;
- De grandes étendues apparaissant sombres sur les images radar et qui se sont révélées être des lacs d'hydrocarbures liquides (méthane et éthane, principalement). Un exemple est montré sur la figure 4. Titan est ainsi le seul objet du système solaire, à part la Terre, à posséder des étendues liquides ;
- Des nombreux lits de rivières et des chenaux de drainage, certains "à sec", d'autres dans lesquels coulent vraisemblablement des hydrocarbures liquides, nombre d'entre eux se jetant dans les lacs ;
- De véritables reliefs karstiques, autrement dit des cañons sculptés par dissolution de la surface par les hydrocarbures liquides ;

- Des formations ressemblant étonnamment aux volcans terrestres. Il s'agit peut-être (même si cela reste à prouver), de "cryovolcans", autrement dit des volcans "froids", rejetant une "lave" visqueuse, constituée d'un mélange d'eau et d'ammoniac.



**Fig.4.** Image radar d'une région proche du pôle nord de Titan, prise par la sonde Cassini. L'étendue noire sur cette image est une partie d'un vaste lac de méthane et d'éthane liquides. L'image fait environ 270 km par 160 km, avec une résolution de 300 m (Image JPL PIA09211 – Crédit photo : NASA/JPL/Space Science Institute).

Et c'est bien là un élément majeur de la géologie et de la chimie de Titan : la présence d'hydrocarbures

liquides, principalement de méthane et d'éthane ( $C_2H_6$ ).

Ceux-ci sculptent littéralement le paysage. Il existe sur Titan un véritable cycle du méthane, à l'instar du cycle de l'eau sur Terre. La différence principale, toutefois, vient de la chimie très complexe que méthane et diazote engendrent sur cet astre.

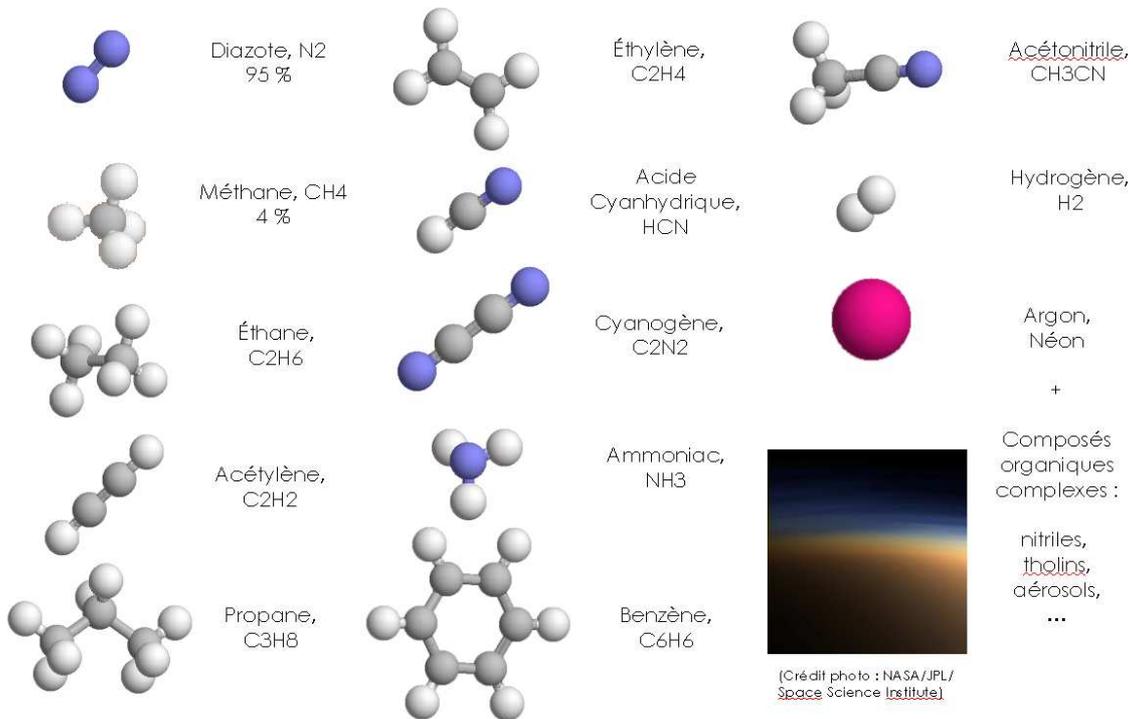
### La chimie au frigo

Si Titan fascine autant les scientifiques, c'est parce qu'il est, dans notre système solaire, le siège de la chimie organique (à base de carbone) la plus complexe après celle de la Terre.

Bien entendu, les températures glaciales de Titan n'ont sans doute pas permis le développement de la vie sur cette lune. Cependant, la chimie qui s'y déroule ressemble beaucoup à celle que les chercheurs imaginent pour la Terre à ses débuts.

C'est la présence d'azote et de méthane qui est à l'origine de l'ensemble des processus chimiques à l'œuvre sur Titan.

Dans la haute atmosphère, ces deux molécules sont dissociées par le rayonnement ultraviolet du Soleil. Les fragments moléculaires se recombinaient en molécules réactives de plus en plus complexes : hydrocarbures, nitriles, ... jusqu'à des composés organiques se condensant sous la forme de la fameuse brume orangée emplissant l'atmosphère et regroupés sous le nom de tholins. La figure 5 donne les principales molécules découvertes sur Titan.



**Fig.5.** Les principaux composés chimiques de l'atmosphère de Titan. La photodissociation de  $CH_4$  et de  $N_2$  dans la haute atmosphère mène à toute une série de réactions chimiques produisant des composés organiques complexes regroupés sous le nom de tholins. Ils sont à l'origine de la brume orangée.

Malgré les nombreuses découvertes des sondes spatiales depuis 1980, nous n'en sommes encore qu'au début de la compréhension de la chimie de Titan. Celle-ci fait actuellement l'objet de nombreuses recherches.

Ces recherches suivent deux axes principaux.

- Le premier concerne la spectroscopie de l'atmosphère de Titan, afin de déterminer toutes les espèces chimiques qui y sont présentes. Un élément important est en particulier la modélisation du spectre d'absorption du méthane. Les bandes d'absorption de cette molécule dominant largement le spectre de Titan, il est en effet nécessaire de les modéliser précisément afin, d'une part, de pouvoir les "soustraire" pour identifier les autres composés moins abondants et, d'autre part, de pouvoir extraire le spectre de la surface vue à travers l'atmosphère et d'en étudier les propriétés. Un projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche est actuellement en cours sur ce sujet et regroupe des laboratoires de Meudon, Dijon, Grenoble et Reims.

- Le second axe concerne la chimie de Titan proprement dite, en vue d'une modélisation globale utilisant à la fois des expériences de laboratoire et des calculs très complexes de chimie quantique.

### Conclusion : Qu'avons-nous appris ?

Notre connaissance de ce monde étrange et mystérieux a fait un bond de géant au cours des dernières années.

Plusieurs indices semblent indiquer qu'un océan d'eau liquide (éventuellement mélangée à de l'ammoniac) existe sous la surface de Titan. En effet, d'un survol à l'autre, les observations radar ont montré qu'un certain nombre de formations géologiques avaient bougé, parfois de plus de 30 km en deux ans et demi. Ceci indiquerait que la

croûte de glace flotte sur une couche liquide.

Plus généralement, le diamètre et la masse de Titan (et donc sa masse volumique) sont similaires à ceux des satellites de Jupiter Ganymède et Callisto. Sur la base d'une masse volumique de  $1,88 \text{ g/cm}^3$ , on en déduit que Titan serait composé à moitié de glace d'eau et à moitié de roches (incluant des silicates et du fer).

Ces composés plus lourds sont très peu présents en surface où la glace est le composant principal de la croûte de Titan, mais ils formeraient le noyau (par un phénomène de différenciation, au début de l'histoire du satellite).

La glace est quant à elle majoritairement de la glace d'eau mais elle est probablement mélangée avec de la glace d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) ainsi qu'avec des glaces d'hydrocarbures, principalement du méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de l'éthane ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ).

De nombreuses questions restent toutefois en suspens :

1. Pourquoi Titan a-t-il une atmosphère ? D'autres gros satellites du Système Solaire (les satellites galiléens de Jupiter, par exemple) n'en ont pas.

2. Quelle(s) est (sont) la (les) source(s) de méthane ? Cette molécule est en effet détruite petit à petit par le rayonnement UV du Soleil dans la haute atmosphère et aurait dû disparaître en 50 millions d'années. Le méthane sur Titan est donc constamment renouvelé :

- Les lacs observés ne constituent pas une réserve suffisante de méthane.

- Le méthane est-il stocké dans le sous-sol sous forme de clathrates ? (Ils sont constitués de cages de molécules d'eau emprisonnant d'autres molécules, comme du méthane, par exemple).

- Est-il rejeté dans l'atmosphère par des cryovolcans ? ■

#### Les dernières conférences de l'année organisées par la SAF :

Le 6 avril : **Roseta, découverte des astéroïdes et comètes**, par Philippe Lamy

Le 11 mai : **L'eau dans le système solaire**, par Thérèse Encrenaz

Le 8 juin Curiosity : **l'exploration de Mars reprend**, par Gilles Dawidowicz

Ces conférences ont lieu au FIAP (Foyer International d'Accueil de Paris), 30 rue Cabanis  
75014 Paris Métro Glacière.

Les 11 et 12 juin 2011 inauguration de la lunette et la coupole restaurée de l'observatoire Camille Flammarion à Juvisy-sur-Orge (L'observatoire est situé à l'intersection de rue de l'Observatoire et de l'avenue de la Cour de France (ex Nationale 7) 91260 Juvisy sur Orge

En savoir plus : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Observatoire\\_de\\_Juvisy-sur-Orge](http://fr.wikipedia.org/wiki/Observatoire_de_Juvisy-sur-Orge)

**L'École d'Été du CLEA se déroulera du 19 au 26 août 2011 au Col Bayard Gap.  
L'annonce détaillée sera faite prochainement sur le site.**

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Comment "peser" Saturne ?

Jean-Yves Beauchot, Chalon/Saône

La troisième loi de Kepler est au programme de physique-chimie en classe de Terminale S. Son application à la mesure de la masse d'une planète à partir de l'observation du mouvement d'un de ses satellites est toujours étonnante pour les élèves. Je présente ici le cas de la masse de Saturne à partir de l'observation de Titan. Ce travail a été réalisé dans le cadre du club d'astronomie du lycée, en partenariat avec la Société d'astronomie de Saône et Loire.

### Introduction

On considère un satellite dont l'orbite est circulaire (les excentricités des principaux satellites de Saturne sont très faibles), de rayon  $r$  (en m), de période de révolution  $T$  (en s) autour d'un astre de masse  $M$  (en kg). La troisième loi de Kepler a pour expression :

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

La masse de l'astre s'écrit alors :  $M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$ .

Le calcul de la masse nécessite par conséquent de mesurer le rayon de l'orbite d'un satellite ( $r$ ) ainsi que sa période de révolution ( $T$ ).

### Le protocole

Nous avons fait appel à la Société d'Astronomie de Saône et Loire (SASL) pour nous aider dans la réalisation des prises de vue. Il a été décidé de réaliser une succession de clichés de Saturne sur une période de quelques jours dans la période mi-février 2008. Le matériel utilisé était un télescope Maksutov 125/1 500 muni d'une webcam Philips ToUCam Pro III (spc900nc).

Pour avoir une série de clichés exploitables, il faut réaliser des prises de vue qui ne soient pas trop éloignées dans le temps, les périodes de révolution des satellites de Saturne étant relativement faibles (de 1 à 16 jours pour les satellites les plus visibles sauf Japet avec 79 jours).

La prise de vue avec une webcam a plusieurs intérêts : c'est un matériel peu coûteux et simple à adapter sur un télescope. Par rapport à un appareil photo numérique, la prise de vue à 5 ou 10 images par seconde a le grand intérêt de "figer" la turbulence. La résolution n'est pas bonne mais les traitements qu'on peut faire subir au film permettent d'améliorer énormément le résultat et, de toute façon, le but n'était pas de produire de

jolies images mais de suivre la révolution d'un satellite.

### Clichés

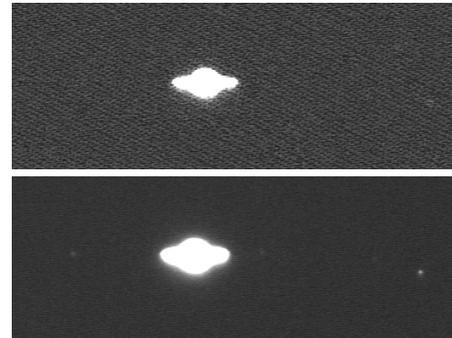


Image brute extraite du film obtenu.

Après traitement par le logiciel "IRIS".

Fig.1. Images de Saturne faite à la webcam.

Nous avons constaté qu'il n'était pas possible de paramétrer l'exposition de la webcam pour faire apparaître les satellites sans surexposer la planète. Pour obtenir une image satisfaisante il faut donc enregistrer 2 films avec des expositions différentes et les traiter séparément avant de fusionner les images obtenues : l'une montrant Saturne sans ses satellites (figure 2) et l'autre les satellites ainsi que la planète fortement surexposée. Après avoir retravaillé les films avec IRIS puis Photoshop, on arrive au résultat de la figure 3.



Fig.2. Saturne à la webcam, avec un temps d'exposition plus court et après traitement.

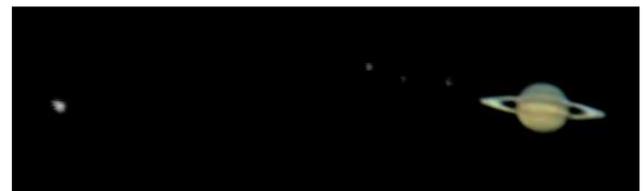
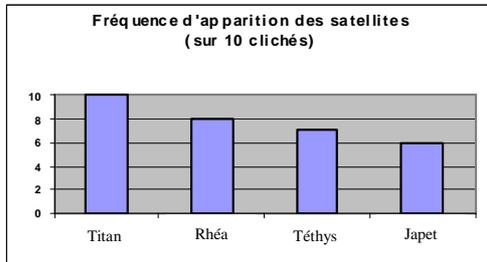


Fig.3. Image finale de Saturne et de ses satellites.

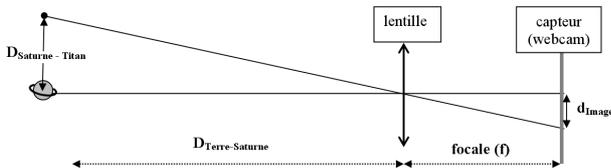
Sur nos clichés, il y avait toujours plusieurs satellites visibles (Titan, Rhéa, Dioné et Thétys), nous avons donc tenté de suivre la révolution de plusieurs d'entre eux mais les caprices de la météo nous ont empêché de suivre ceux dont la période de révolution était trop petite. Nous avons donc travaillé uniquement sur Titan (facile à repérer par son éclat plus important).



Finalement les clichés réalisés et exploitables correspondent aux dates suivantes : 12 janvier puis 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14 et 17 février 2008.

## Calcul de la distance Saturne - Titan

Pour simplifier le schéma nous avons considéré ici que les images étaient observées avec une lunette de focale  $f = 2700$  mm au lieu d'un télescope de même focale.



La propriété de Thalès s'écrit ici :

$$\frac{D_{\text{Saturne-Titan}}}{d_{\text{image}}} = \frac{D_{\text{Terre-Saturne}}}{f}$$

( $D_{\text{Saturne-Titan}}$  représente la distance apparente observée dans le plan perpendiculaire à la ligne de visée.)

$$D'_{\text{Saturne-Titan}} = \frac{d_{\text{image}} \times D_{\text{Terre-Saturne}}}{f}$$

Les valeurs de  $D_{\text{Terre-Saturne}}$  ont été obtenues avec le logiciel Stellarium.

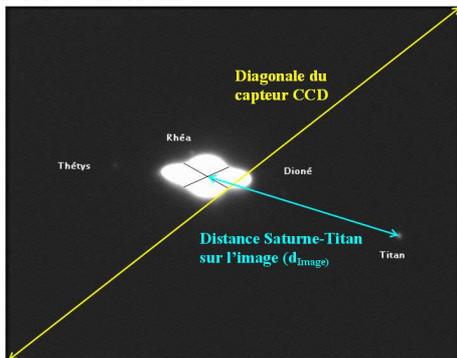


Fig.4. Calcul de  $d_{\text{image}}$ .

Le calcul de la distance  $d_{\text{image}}$  a été fait à partir de la taille du capteur CCD donnée par le fabricant (4,5 mm).

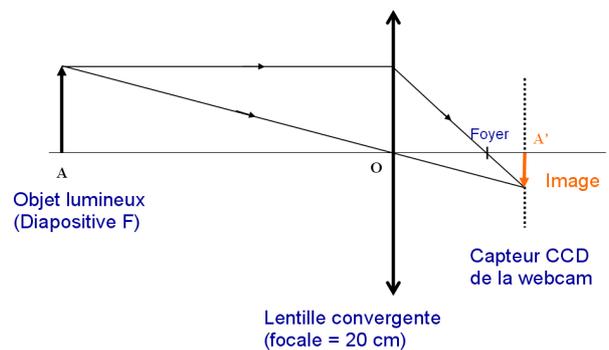
En mesurant sur l'écran de l'ordinateur la diagonale et la distance entre Saturne et Titan, une règle de 3 donne la valeur de  $d_{\text{image}}$  très facilement.

## Une correction sur la taille utile du capteur

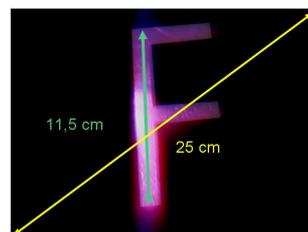
Lorsque nous sommes arrivés au bout de nos calculs le résultat obtenu pour la masse de Saturne n'était pas très bon. Nous avons voulu vérifier si la donnée de la diagonale du capteur était exacte.

Pour cela un montage optique comme celui schématisé ci-après a permis de former une image de taille connue sur le capteur CCD et de vérifier la mesure sur l'écran d'un ordinateur.

La distance OA étant connue ainsi que la taille de l'objet, on peut calculer (avec la relation de conjugaison de Descartes) la taille et la position exacte de l'image.



Avec un objet (lettre F) de 11 mm de haut placé à 137 cm de la lentille, on doit obtenir une image de 1,9 mm à 23,4 cm de la lentille (position du capteur).

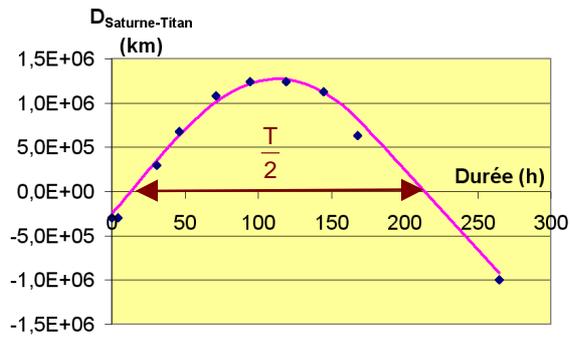


| Sur écran du PC | Sur capteur CCD  |
|-----------------|------------------|
| 11,5            | 0,19             |
| 25              | $D_{\text{CCD}}$ |

Nous avons retenu la valeur de 4,2 mm pour la diagonale du capteur au lieu des 4,5 annoncés.

## Exploitation de la série de mesures

A l'aide des clichés réalisés, nous avons calculé les distances Saturne-Titan ainsi que la durée écoulée depuis la photo du 6 février puis tracé le graphique donnant la distance en fonction de la durée :



En recherchant à modéliser la série de points, nous sommes arrivés à :

$$D(t) = 1,27 \cdot 10^6 \times \sin\left(\frac{2\pi t}{400} - 0,2\right) \quad (D \text{ en km et } t \text{ en h})$$

## Conclusion - Résultats

La plus grande distance apparente entre Saturne et Titan, donc le demi grand axe de l'orbite de ce dernier vaut :  $r = 1,27 \cdot 10^6$  km et sa période de révolution vaut  $T = 400$  h, soit  $1,44 \cdot 10^6$  s.

L'application de la 3<sup>e</sup> loi de Kepler donne alors la masse de Saturne :

$$M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} = \frac{4\pi^2 \times (1,27 \cdot 10^9)^3}{6,67 \cdot 10^{-11} \times (1,44 \cdot 10^6)^2}$$

soit  $M = 5,85 \cdot 10^{26}$  kg au lieu de  $5,69 \cdot 10^{26}$  kg que l'on trouve dans la littérature, soit 3 % d'erreur. ■

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Une maquette de Saturne

**Hervé Faivre, atelier d'astronomie du collège de Semur-en-Auxois**

*Dans le numéro 128, Hervé Faivre nous présentait les activités de son atelier d'astronomie et les images de Saturne obtenues grâce à une webcam et un C8. Il nous décrit ici la construction d'une maquette de Saturne réalisée dans le cadre de cet atelier.*

Parmi les différents projets de l'atelier d'astronomie du collège en 2010, une réalisation matérielle nous a servi de fil rouge : la construction d'une maquette de Saturne avec ses anneaux et ses satellites. L'atelier compte une quinzaine d'élèves, qui ont maintenant pour habitude de se diviser en plus petits groupes autour de projets de maquettes montrant divers objets d'astronomie. Partant de l'observation d'une maquette du système solaire des années antérieures et des images astro obtenues avec le télescope et la caméra CCD, les élèves avaient constaté qu'il y avait un problème d'échelle dans l'anneau de Saturne qui, de plus, ne montrait pas la division de Cassini. Cette dernière est importante pour nous car elle sert de repère pour le traitement d'images par "régistration" à partir des petites vidéos obtenues avec la CCD. L'idée est donc venue de construire une nouvelle maquette montrant Saturne et ses anneaux à l'échelle.

Nous voilà donc partis avec un projet. Vite arrivent les premiers croquis, les premières hypothèses sur les matériaux à utiliser et l'inventaire de ce que l'on veut montrer. À l'origine, la première idée était de présenter la planète avec ses principaux satellites bien visibles sur nos clichés dans un plan au format A2 environ.

Les recherches documentaires commencent et occupent plusieurs séances de l'atelier. Nous collectons diverses valeurs des tailles et distances car nous devons vite partir sur une base solide avec une échelle à choisir. On comprend très vite que l'on aura du mal à montrer Saturne et ses satellites en détail avec les dimensions choisies. L'idée évolue donc vers une maquette montrant un seul hémisphère disposé verticalement contre le mur, incliné de 30° par rapport au plan du mur pour bien voir les anneaux et incliné aussi par rapport au sol pour pouvoir placer Titan dans l'angle de la salle de classe juste sous le plafond. Titan sera une petite sphère de 2 cm presque ridicule à plusieurs mètres de là.

Que faire pour toutes les autres lunes plus lointaines et bien plus petites ? Nos plans n'arrêtent pas d'évoluer et jusqu'au bout il va falloir modifier, ajuster, adapter. Pas facile de faire des concessions et de revenir sur des idées qui nous paraissent si géniales sur le papier...

À force de discussions et de pourparlers, on arrive à peu près à ficeler le projet. Il faut le budgétiser et trouver un maximum de matériau de récupération : peinture, contreplaqué, pinceaux, équerres en bois... Il faut quand même passer à la caisse pour acheter

des boules de polystyrène et du plexiglas pour faire un anneau rigide, fin et transparent dans ses divisions. Globalement, c'est une quarantaine d'euros qu'il nous faudra après déduction de tout ce qu'on a pu récupérer. C'est le Foyer Socio-Éducatif du collège qui est notre principal bailleur de fonds pour l'atelier. Il est plutôt généreux à la hauteur de ses moyens, il intervient souvent aussi pour nos sorties. Une fois le matériel acheté, il y a plus qu'à...

Saturne sera représenté par une demi boule de 30 cm pour 120 000 km de diamètre... ça va nous aider pour choisir les échelles. L'autre hémisphère servira à un autre groupe pour une maquette de la face visible de la Lune. Il faut découper le plexi.



*Le début de la décoration.*

C'est L'OP du collège qui s'en charge. Je n'aurais pas aimé être à sa place compte tenu de la pression que lui ont mis les élèves en insistant sur le prix et le fait qu'il ne pouvait pas se permettre de le fendre... Soulagement, le découpage est impeccable. On voudrait bien commencer à assembler, peindre... mais il faut reprendre les recherches. Quelle couleur prendre pour Saturne ? Suivant les sources, on ne trouve pas deux représentations de la même couleur. On part donc à la recherche d'explications, sur les couleurs en astronomie et leur signification, sur l'atmosphère de la planète, ses mouvements, ses cyclones, le nuage polaire hexagonal qu'on découvre... toutes ces choses qu'on voudra représenter en peinture. On essaiera aussi de représenter l'épaisseur des anneaux avec des couleurs plus ou moins intenses.

On trace des cercles, beaucoup de cercles, avec de grands compas de tableau, les anneaux avec les valeurs de rayons que nous avons calculées. Pour les couches de l'atmosphère c'est assez compliqué, il faut tracer sur l'hémisphère des cercles concentriques aux différentes latitudes avec un axe incliné à 30°. Plusieurs essais sont nécessaires. Premiers coups de pinceaux sur le polystyrène, sur le plexi : grosse déception, c'est vraiment moche et très loin de ce qu'on avait imaginé. Les peintures ne

conviennent pas... Il nous faut appeler au secours le prof d'arts plastiques qui nous a déjà rendu pas mal de services par le passé pour des maquettes en astronomie ainsi qu'à l'atelier Sciences de la Vie et de la Terre. Il est justement occupé dans la salle d'à côté. Il nous sauve la mise, il prend en compte les demandes des élèves qui lui exposent ce qu'ils veulent montrer sur la maquette. Avec ses techniques de pinceau, son vernis magique qui donne le rendu brillant qu'on espérait, les polices d'écriture qu'il modifie... il nous a bien aidé sur plusieurs séances.



*La maquette de Saturne terminée.*

Il ne nous reste plus qu'à fixer les anneaux avec d'anciennes équerres en bois de 30° peintes en noir pour les rendre plus discrètes. Il a fallu choisir comment et où fixer les étiquettes pour nommer les anneaux et divisions. Finalement les satellites plus modestes ne seront pas représentés avec des têtes d'épingles sur le mur blanc, ils seront regroupés dans une bulle sur le panneau. La dernière touche a été apportée par un élève qui a eu l'idée de recycler une boule de polystyrène de 3 cm pour faire la Terre à la même échelle. La touche finale avant la prochaine...



*Le groupe et sa maquette. En fin d'année scolaire, les divers ateliers doivent traditionnellement exposer leurs travaux au CDI (maquettes de volcans, élevages de phasmes...). On pose fièrement.*

## D'où viennent les noms des satellites de Saturne ?

Jean Ripert

*Autour de Saturne, plus de 60 satellites ont été découverts jusqu'à présent. Nombreux sont ceux qui ont été nommés. Je savais que ces noms provenaient de la mythologie grecque. J'ai voulu plonger dedans et j'ai eu du mal à m'y retrouver au milieu de toutes ces intrigues entre dieux. Suivez-moi si vous souhaitez en savoir plus. Les noms des satellites sont en gras lorsqu'ils apparaissent pour la première fois et entre parenthèse est notée la date de leur découverte.*

Christian Huygens découvre le plus gros satellite (diamètre de 5 150 km) en 1655 et l'appelle "lune de Saturne".

En 1671-1672, Jean Dominique Cassini découvre les quatre autres satellites de plus de 1 000 km de diamètre, et, en l'honneur de Louis XIV, les nomme les "étoiles de Louis". Mais les astronomes les appelaient Saturne 1, Saturne 2, ...

C'est William Herschel qui découvre les deux suivants (504 et 396 km de diamètre) et ce n'est qu'en 1847 que John Herschel propose de donner aux satellites des noms associés à Saturne (Cronos chez les Grecs) et tirés de la mythologie, en particulier ceux des Titans et Titanides, frères et sœurs de Cronos, le plus gros d'entre eux s'appelant simplement **Titan** (25-03-1655).

Mais qui sont les autres ?

Bien avant les dieux, il y avait au début Gaïa (Tellus chez les Romains, la Terre) qui engendra Ouranos (Uranus), le ciel. Pour peupler ce monde, ils s'unirent pour donner naissance aux Cyclopes : Brontès (le tonnerre), Stépès (l'éclair) et Argès (la foudre) et aux Hécatonchires (Centimanés chez les Romains) qui avaient 100 bras : Kottos, Gyès et Briarée (ou **Égéon**) (15-08-2008).

Ouranos avait horreur de ses enfants, ainsi, il jeta les Cyclopes dans le Tartare, triste lieu au plus profond des Enfers (le monde souterrain).

La Terre et le Ciel donnèrent également naissance aux Titans (nous y voilà) et aux Titanides (les filles). Leur nombre varie suivant les sources. Les Titans les plus connus sont Crios, Coéos, Océan, mais il y eut aussi Cronos (à ne pas confondre avec Chronos – le temps) **Japet** (25-10-1671) et **Hypérion** (16-09-1848) (tiens voilà des satellites). Pour les Titanides, on retrouve Théia, Thémis, Eurybie, mais aussi d'autres dont le

nom fut donné à des satellites : **Thétys** (21-03-1684), **Phœbé** (16-08-1898), **Rhèa** (23-12-1672).

Frères et sœurs formèrent des couples et eurent des enfants parfois assimilés aux Titans. Ainsi de Rhèa et Cronos naquirent Hadès (Pluton), Poséidon (Neptune), Zeus (Jupiter) ainsi que Hestia (Vesta), Héra (Junon) et Déméter (Cérès). Les trois frères se partagèrent le monde : Pluton prit les Enfers, Jupiter le ciel et Neptune les eaux.

Hypérion et Théia vont engendrer Hélios (Soleil) et Séléné (Lune).

Les océanides dont **Télesto** (08-04-1980) sont les enfants d'Océan et Téthys.

Japet et Clyménée (ou parfois Asia) eurent des enfants très appréciés comme satellites ; **Prométhée** (oct 1980), **Épiméthée** (1977 / 26-02-1980) **Atlas** (oct 1980), Ménoétios. Par son union avec Plémonie, Atlas donna naissance aux Pléiades (7 filles dont Maia), aux Hyades dont **Dioné** (21-03-1684) et à **Calypso** (13-03-1980) nymphe amoureuse d'Ulysse.

Maia et Zeus eurent Hermès (Mercure) qui avec une nymphe, engendra **Daphnis** (01-05-2005) et **Pan** (1990).

Mais revenons aux problèmes de nos dieux.

Gaïa ne supportant plus qu'Ouranos jette ses enfants dans le Tartare ou les dévore (ou oblige Gaïa à les garder en elle, selon les sources), fomenta une terrible vengeance. Elle tira de son sein un silex tranchant, en fit une faucille et informa ses enfants de son projet. Profitant du sommeil de son père, Cronos émascula Ouranos à l'aide de la faucille. Le sang tombé sur Gaïa donna naissance, entre autres, aux Géants dont **Encelade** (28-08-1789) et **Mimas** (18-07-1789).

Après une première guerre entre les enfants de Cronos réfugiés sur l'Olympe et les Titans, dont Zeus sortit vainqueur grâce à l'aide des Cyclopes et des Hécatonchires qu'il avait sortis des Enfers, ce fut au tour des Géants, poussés par Gaïa, de prendre d'assaut l'Olympe en empilant des montagnes sur des montagnes. Les dieux firent appel à Prométhée et Héraclès (Hercule), celui-ci fit basculer les montagnes et les écrasa.

Mimas fut tué par Héphaïstos (Vulcain) à l'aide de fer fondu. Quant à Encelade qui s'échappait, Athéna (Minerve) jeta sur lui la Sicile (eh oui !). Il y est toujours prisonnier, son haleine de feu sort par l'Etna et lorsqu'il se retourne, il provoque des tremblements de Terre !

Prométhée eut un différend avec Zeus au sujet du partage d'un taureau. Pour se venger, Zeus envoya en présent à Épiméthée, frère de Prométhée, une femme très belle, mais sottée, méchante et paresseuse : **Pandore** (oct 1980). Courroucé par le refus de celui-ci, Zeus fit attacher Prométhée dans le Caucase. C'est là qu'un vautour lui dévorait le foie le jour ...

Zeus, qui fit la conquête de plusieurs femmes, eut avec Léda, épouse de Tyndare, **Hélène** (01-03-1898), Castor, **Pollux** (21-10-2004) et Clytemnestre (parfois ces deux derniers sont cités comme enfants de Tyndare).

Le Géant Alcyonée tué par Hercule, eut deux filles **Méthone** (01-06-2004) et **Pallène** (01-06-2004). Hercule tua également **Antée** (30-05-2007) un lutteur fils de Poséïdon et Gaïa.

Un satellite porte le nom de **Janus** (15-12-1966 / 19-02-1980), celui qui ouvre les portes et qui présente deux visages.

Les 23 satellites cités ci-dessus ont une orbite circulaire peu inclinée par rapport au plan équatorial de Saturne. Ce sont :

- les 7 satellites les plus massifs : Titan, Rhéa, Japet, Dioné, Téthys, Encelade et Mimas ;

- les 4 satellites troyens Hypérion (en résonance avec Titan) et les alcyonides Méthone, Anthée et Pallène (entre Mimas et Encelade) ;

- les petits satellites bergers qui circulent dans les anneaux ou les divisions : Pan, Daphnis, Atlas, Prométhée, Pandore et Égéon, ainsi que Janus et Épiméthée qui sont co-orbitaux ;

- les 4 satellites qui occupent les points de Lagrange de Téthys (Telesto et Calypso) ou ceux de Dioné (Hélène et Pollux).

Nous voilà avec 23 satellites alors que 53 satellites gravitant autour de Saturne sont répertoriés. Les 30 restants sont des satellites irréguliers, c'est-à-dire éloignés de la planète, avec une orbite fortement inclinée par rapport au plan équatorial de Saturne et parfois rétrogrades. Ils ont tous un diamètre inférieur à 30 km sauf un seul. Ce sont des objets ou des morceaux d'objets capturés par la planète. Phœbé, qui est rétrograde, est classé parmi les satellites irréguliers.

Comme les Titans et leurs descendants ne sont plus assez nombreux, on leur a attribué des noms de géants d'autres mythologies.

Un classement a été fait en fonction de l'inclinaison de leur orbite. On distingue ainsi :

- le groupe des Celtes, peu inclinés (35° à 40°) : **Albionix** (09-11-2000) plus connu sous le nom gallo-romain de Toutatis, **Bebhionn** (12-12-2004) géante renommée pour sa beauté, **Erriapus** (23-09-2000) géant et **Tarvos** (23-09-2000) taureau aux trois grues ;

- le groupe des Inuits (inclinaison comprise entre 40 et 50°) : **Kiviuq** (07-08-2000) sorte d'Ulysse, **Ijiraq** (23-09-2000) croque-mitaine qui enlève les enfants, **Paaliaq** (07-08-2000) chaman, **Siarnaq** (23-09-2000) [40 km] déesse inuite qui donne naissance aux créatures de la mer, on l'appelle aussi Sedna, nom d'une planète naine et **Tarqe** (16-01-2007) dieu lunaire ;

- le groupe nordique rétrograde (inclinaison de 136° à 175°) : Phœbé 215 km de diamètre (Titanide), **Skathi** (23-09-2000) géante nordique, son nom est donné à une montagne vénusienne Skadi Mons, **Skoll** (05-01-2006), **Fenrir** (13-12-2004) et **Hati** (12-12-2004) [trois frères loups géants, **Greip**, (05-01-2006), **Bestla** (13-12-2004), **Jarnsaxa** (05-01-2006) Géantes, **Thrymr** (23-09-2000), **Farbauti** (12-12-2004) Géants, **Narvi** (05-02-2003) petit-fils du précédent, **Bergelmi** (12-12-2004) géant de glace, **Ymir** (07-08-2000) ancêtre des géants de glace, **Suttungr** (23-09-2000) géant détenteur de l'hydromel de la sagesse, **Aegir** (12-12-2004) géant qui calme la tempête, **Fornjot** (12-12-2004) géant des tempêtes, **Kari** (04-01-2006) géant des vents, **Surtur** (05-01-2006) chef des géants de feu, **Loge** (05-01-2006) géant de feu.

Tous les satellites irréguliers ont été découverts par des équipes utilisant le télescope du Mauna Kea sauf évidemment Phœbé, mais aussi Kiviu.

Pour en savoir plus :

<http://mythologica.fr>

<http://planetarynames.wr.usgs.gov/Page/Planets>

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Quelques calculs autour de Saturne

Pierre Causeret

*L'opposition de Saturne peut être l'occasion de faire faire quelques calculs à nos élèves. Voici quelques idées.*

1. À partir de la photo ci-dessous prise par le télescope Hubble et qui ressemble à ce que l'on peut observer actuellement, sauriez-vous calculer :

- L'aplatissement de la planète ?
- L'inclinaison des anneaux par rapport à la ligne de visée?



2. Le diamètre réel de Saturne a été calculé à partir de la distance de la planète et de son diamètre apparent. Pour la distance, Copernic avait fait le plan du système solaire (à partir des mouvements apparents des planètes) et les mesures de parallaxe de Mars puis du Soleil ont permis d'avoir l'échelle de ce plan. Pour le diamètre apparent, une simple observation à la lunette ou au télescope suffit.

À partir de ces données, sauriez-vous calculer le diamètre réel de Saturne ?

Diamètre apparent de Saturne début avril :  $19''$

Distance : 1 290 000 000 km.

3. Calculez la masse volumique de Saturne.

On donne :

Rayon équatorial : 60 330 km

Rayon polaire : 54 000 km

Masse :  $5,7 \cdot 10^{26}$  kg

(on peut aussi effectuer le calcul à partir du rayon moyen de 58 140 km en assimilant Saturne à une sphère)

4. L'épaisseur des anneaux de Saturne est inférieure à 100 m. Le diamètre extérieur de l'anneau A (limite de la partie visible dans un petit instrument) est de 137 000 km. On veut réaliser une maquette de ces anneaux en découpant un disque de 13,7 cm de rayon dans une feuille de papier de 0,1 mm

d'épaisseur. À cette échelle, la feuille de papier est-elle trop épaisse ou pas assez ? Et de quel facteur ?

5. Saturne est presque 10 fois plus grosse que la Terre (en diamètre). Combien pourrait-on mettre de Terres dans Saturne ?

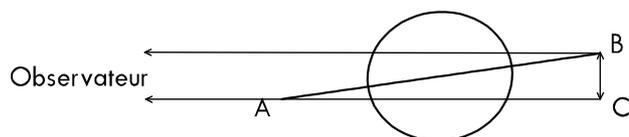
6. Saturne effectue une rotation sur elle-même en 10 h 47 min et 6 s et une révolution autour du Soleil en 29 ans et 165 jours 10 757,7 jours).

Combien y a-t-il de jours saturniens dans une année saturnienne ?

### Solutions

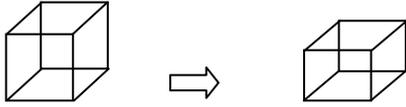
1. a. Sur la photo, on mesure le diamètre équatorial (30 mm) puis le diamètre polaire (27 mm). L'aplatissement est de 3 mm pour 30 mm soit 10%.

b. On mesure sur la photo la largeur des anneaux (68 mm) et leur hauteur (10 mm). Le sinus de l'angle cherché vaut  $BC/AB$  soit  $10/68$ , ce qui donne pour l'angle, 8 à  $9^\circ$ . L'inclinaison des anneaux sera en avril de  $8,7^\circ$ .



2.  $\tan 19'' = \text{diamètre} / 1\,290\,000\,000$ . On trouve ainsi un diamètre de 119 000 km.

3. On obtient le volume d'un ellipsoïde de révolution de rayon équatorial  $a$  et de rayon polaire  $b$  avec la formule  $\frac{4}{3} \times \pi \times a^2 \times b$ . Cette formule se démontre assez facilement à partir de la formule du volume de la sphère  $\frac{4}{3} \times \pi \times r^3$ . En effet, pour obtenir notre ellipsoïde, il suffit d'aplatir une sphère avec un coefficient d'aplatissement de  $b/a$  (les mathématiciens préfèrent parler d'affinité orthogonale). Dans cette opération, chaque cube de 1 km d'arête (avec une face parallèle à l'équateur) devient un pavé dont la base est un carré de côté 1 et dont la hauteur est  $b/a$ .



Le volume de la sphère est donc multiplié par  $b/a$  et  $4/3 \times \pi \times a^3$  devient  $4/3 \times \pi \times a^2 \times b$ . Revenons maintenant à notre problème

$$\text{Volume} = 4/3 \times \pi \times 60\,330^2 \times 54\,000$$

$$\approx 8,23 \cdot 10^{14} \text{ km}^3 \text{ ou } 8,23 \cdot 10^{29} \text{ cm}^3$$

$$\text{Masse volumique} : 5,7 \cdot 10^{29} \text{ g} / 8,23 \cdot 10^{29} \text{ cm}^3 \approx 0,69$$

4. 13,7 cm pour 137 000 km, l'échelle est  $10^{-9}$ . À cette échelle, 100 m deviennent 0,1  $\mu\text{m}$ . La feuille de papier (100  $\mu\text{m}$ ) est encore 1 000 fois trop épaisse !

5. Dans un agrandissement à l'échelle 10, les volumes sont multipliés par 1 000. Saturne contient donc près de 1 000 terres (en réalité un peu moins de 800).

6. Près de 24 000 jours (23 939) ! ■

## ARTICLE DE FOND

# La lumière cendrée de la Lune et ce que les astronomes en font

Danielle Briot, Observatoire de Paris

La lumière cendrée est la légère lueur que l'on peut voir sur la partie de la Lune non éclairée par le Soleil, quand la Lune apparaît sous la forme d'un fin croissant. Cette observation demande, bien sûr, une nuit claire et sans lumière parasite.



Fig.1. La lumière cendrée.

La meilleure explication de la lumière cendrée est "le clair de Terre sur la Lune".

Cette interprétation est généralement attribuée à Galilée qui décrit très clairement le phénomène et en donne l'explication dans le *Sidereus Nuncius* (*Le messager céleste*). Cependant, elle a été retrouvée dans un manuscrit de Léonard de Vinci datant d'un siècle auparavant, et plusieurs contemporains de Galilée, dont certains lui étaient très proches, l'enseignaient bien des années avant la publication du *Sidereus Nuncius*.

La classique figure 2 explique les phases de la Lune. Si on regarde cette figure d'un nouveau point de vue et que l'on s'imagine être sur la Lune, et nécessairement sur la partie de la Lune qui fait face

à la Terre, on voit que pour le Sélénite (l'habitant fictif de la Lune), les phases de la Terre vues de la Lune sont l'inverse des phases de la Lune, telles que nous, Terriens, nous les voyons. En effet, quand c'est la pleine Lune, la partie de la Terre qui fait face à la Lune est dans l'obscurité. On sait bien que la pleine Lune se lève quand le Soleil se couche et qu'elle se couche au lever du Soleil, donc depuis la Lune à ce moment-là, on ne "verra" que la Terre obscure, c'est-à-dire qu'on ne verra rien (*NDLR : la nouvelle Terre vue depuis la Lune est-elle totalement invisible ou l'atmosphère apparaît-elle lumineuse sur le limbe terrestre ? Voilà un problème que nous n'avons pas pu résoudre*). Pendant la nouvelle Lune, on voit que la partie de la Terre qui fait face à la Lune est bien éclairée : la nouvelle Lune n'est dans le ciel que pendant la journée.

La Terre éclairée par le Soleil, l'éclaire donc de son "Clair de Terre", mais pour nous qui sommes en plein jour, cela n'est pas visible. Il nous faut donc pouvoir l'observer la nuit, donc dans les quelques jours précédant ou suivant la nouvelle Lune, c'est-à-dire au début ou à la fin du cycle lunaire. La Lune est alors un fin croissant, visible dans le crépuscule du soir ou le crépuscule du matin, et comme la Terre vue de la Lune est encore très éclairée, la lumière cendrée est visible entre les cornes lumineuses.

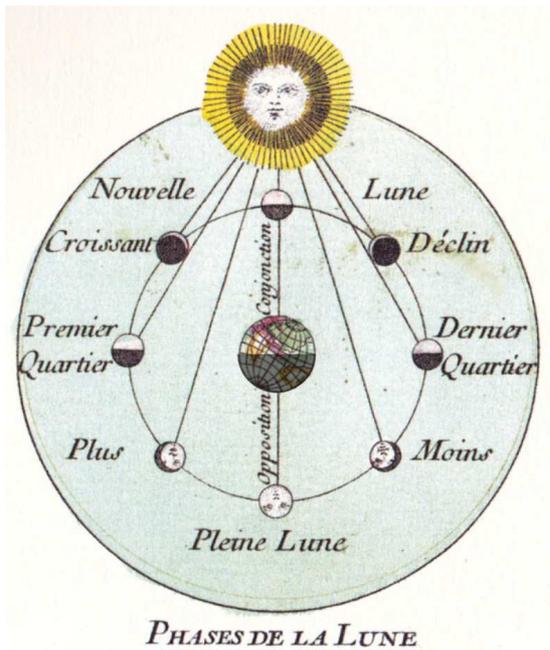


Fig.2. Les phases de la Lune d'après la *Cosmographie de l'académie des enfans*, un ouvrage de 1774 réédité par la bibliothèque de Noyers sur Serein (89).

La figure 3 montre le trajet de la lumière responsable de la lumière cendrée. La lumière du Soleil arrive sur la Terre, est réfléchiée par la Terre jusque sur la Lune, puis revient sur la Terre, où elle peut être observée depuis la partie non éclairée de la Terre. Au cours de ce trajet, la lumière a traversé trois fois l'atmosphère terrestre.

On notera que la Terre étant plus grande que la Lune, elle apparaît forcément plus grande vue depuis la Lune que la Lune vue depuis la Terre. Le clair de Terre sur la Lune sera donc plus intense que le clair de Lune sur la Terre.

La lumière cendrée est un très bon exemple de sujet scientifique qui, suivant les époques, est attentivement étudié ou négligé. On a très vite compris que le reflet de la Terre sur la Lune pouvait être analysé et donner des informations sur notre Terre. Dès 1914, Tikhov, un astronome russe, en conclut que la Terre vue de l'espace apparaît bleue. Dans "l'Astronomie populaire", Flammarion assure que les astronomes avaient deviné la présence de l'Australie avant qu'elle soit effectivement découverte, par la lumière cendrée, beaucoup trop claire pour avoir été produite par l'océan seul.

Nous n'avons malheureusement pas encore trouvé à quels travaux astronomiques Flammarion fait allusion, ni quel en fut l'auteur. Se serait-il laissé emporter par son imagination ? À l'heure actuelle, après avoir été longtemps négligée, la lumière cendrée est de nouveau l'objet d'observations et d'études par plusieurs équipes d'astronomes.

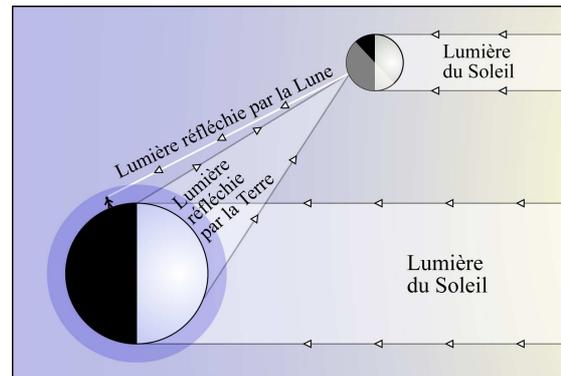


Fig. 3. Explication de la lumière cendrée.

## Les études actuelles de la lumière cendrée

La découverte de la première planète extrasolaire en 1995, bientôt suivie de beaucoup d'autres puisqu'actuellement on en connaît plus de 500, a relancé de façon très vive les études de la recherche de la vie dans l'Univers. Plusieurs de ces planètes seraient éventuellement susceptibles d'abriter la vie (planètes telluriques, situées à la bonne distance de leur étoile). Cependant, aucune de ces planètes n'a pu, jusqu'à présent, être directement observée. On espère que cela sera possible dans un futur pas trop lointain, grâce aux progrès instrumentaux. Et comment, à ce moment-là, détecter la vie sur une planète qui apparaîtra, au mieux, comme un point ? On tente l'expérience en utilisant la seule planète connue jusqu'à présent pour abriter la vie, c'est-à-dire notre belle planète Terre, en observant la Terre dans sa globalité, comme le serait une planète vue de façon ponctuelle. Or la surface de la Lune étant rugueuse chaque point de la surface de la lumière cendrée reflète la totalité de la Terre comme on peut le voir sur la figure 3. On aurait pu faire des observations de la Terre depuis un engin spatial à très grande distance, mais aucun satellite ayant voyagé au delà du système solaire n'a été programmé pour de telles observations. Et quelles formes de vie rechercher ? Il est infiniment probable que la vie sur une planète extrasolaire aura des formes tout à fait nouvelles. Mais comme on ne connaît rien sur ces éventuelles nouvelles formes de vie, on recherche les traces de la vie telle que nous la connaissons sur Terre. Aucune forme de vie animale ne peut être détectée depuis une telle distance. Même la Grande Barrière de Corail, qui est la plus vaste colonie animale connue, ne pourrait être détectée d'au delà du système solaire. Cependant, la végétation recouvre de très vastes surfaces sur Terre : ainsi, la forêt amazonienne recouvre 7 millions de kilomètres carrés. On peut donc rechercher la chlorophylle terrestre dans le

spectre de la lumière cendrée de la Lune. Le spectre de "réflectance" de la végétation est présenté sur la figure 4.

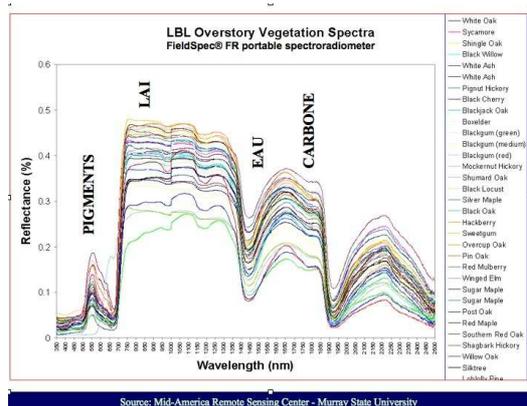


Fig.4. réflectance de la végétation.

Nous voyons que ce spectre, s'il présente une remontée d'intensité dans les longueurs d'onde correspondant à la couleur verte, ce qui explique que nous voyons l'herbe verte, présente une remontée d'intensité bien plus importante et très caractéristique, dans le proche infrarouge, à une longueur d'onde située entre 700 nm et 750 nm. Nous appelons cette remontée spectrale le "Vegetation Red Edge". Si nos yeux pouvaient voir dans l'infrarouge, l'herbe nous apparaîtrait "infrarouge".

Notons que la recherche de la végétation terrestre dans la lumière cendrée avait été prévue en 1912 par Arcichovsky, un astronome russe, dans l'intention de détecter de la végétation sur les planètes du système solaire, mais l'instrumentation de l'époque ne permettait pas une telle étude et bien évidemment sa suggestion avait été totalement oubliée. De façon indépendante, Jean Schneider, astronome à Meudon, eut la même idée en 1998. Depuis lors, la chlorophylle terrestre a été détectée

**LAI** signifie Leaf Area Index en français : Indice de Surface Foliaire (ISF) qui se définit comme étant la moitié de la surface totale occupée par les feuilles par unité de surface.

dans la lumière cendrée par plusieurs équipes d'astronomes français et d'astronomes américains. À partir d'observations au NTT (New Technology Telescope) de l'ESO (European Southern Observatory), nous avons obtenu une valeur de la remontée infrarouge de la chlorophylle de 4%, quand des continents, Europe et Afrique, font face à la Lune, et une valeur de 1,3% quand c'est l'Océan Pacifique. On détecte aussi des molécules atmosphériques de vapeur d'eau, d'oxygène moléculaire (dioxygène), d'ozone, de méthane, qui peuvent être des indicateurs d'une activité biologique.

Cependant, puisque les observations de la lumière

cendrée se font sur une Lune en forme de croissant, sous nos latitudes ce sont des observations de crépuscule, du soir ou du matin, donc des observations de durée assez brève. Les parties éclairées de la Terre qui font face à la Lune dépendent de l'emplacement du télescope. Ainsi, pour les observations faites depuis le Chili, le matin l'Europe et l'Afrique éclairées font face à la Lune, alors que pour les observations du soir, c'est l'Océan Pacifique. Heureusement, il nous reste d'autres possibilités : à de très hautes latitudes, les conditions de visibilité de la Lune ne sont pas les mêmes. À certains moments de l'année, la Lune dans les premiers jours et les derniers jours du cycle peut être vue pendant une grande partie du nyctémère<sup>3</sup> (jour de 24 h), et même, si l'on est suffisamment proche du pôle, pendant le cycle complet de 24 h. Afin d'étudier de façon plus approfondie le spectre de la chlorophylle en fonction des "paysages" terrestres se reflétant sur la Lune, nous avons utilisé la station scientifique franco-italienne Concordia, située en Antarctique, au Dôme C, à une latitude de 75° sud. Nous avons mis en œuvre le programme LUCAS (LUMière Cendrée en Antarctique par Spectroscopie) pour lequel nous avons conçu et construit une instrumentation dédiée, télescope et spectrographe, que nous avons "antarctisée", c'est à dire que nous avons isolé et traité l'instrumentation afin qu'elle puisse fonctionner en Antarctique. En effet, les conditions à Concordia sont assez rudes (et ceci est bien évidemment un euphémisme). La station se trouve sur un plateau à 3220 m d'altitude. La température moyenne est de - 50,8 °C et la température minimale relevée est de - 84,4 °C. La nuit polaire dure 3 mois. La station Concordia et les études scientifiques qui y sont menées mériteraient un article complet. Des observations de la lumière cendrée ont été obtenues au cours de la deuxième saison d'hiver, après que nous ayons amélioré notre instrumentation afin qu'elle soit mieux adaptée aux extrêmes conditions physiques régnant au Dôme C. Les données d'observation obtenues sont actuellement en cours de traitement. C'est un plaisir pour moi que de citer les principaux scientifiques du programme LUCAS : Luc Arnold, Stéphane Jacquemoud, Jean Schneider, Jérôme Berthier, Patrick Rocher, sans oublier, bien sûr, les vaillants hivernants de la station Concordia : Karim Agabi, Éric Aristidi, Erick Bondoux, Zalpha Challita, Denis Petermann et Cyprien Pouzenc. ■

<sup>3</sup> Nyctémère : un nyctémère correspond à une période de 24 heures au cours de laquelle on observe, généralement, une alternance du jour et de la nuit.

## Annexe : Notre bonne vieille Terre vue de la Lune

Danielle Briot

C'est un très bon exercice que de réfléchir sous quelles formes se présente notre Terre vue de la Lune. On s'échappe ainsi de notre système de référence habituel. Et l'on peut voir que de nombreux auteurs de science fiction n'ont pas toujours su se mettre à la bonne place.

Quelques rappels qui posent le problème : la Lune tourne autour de la Terre en 29,5 jours (lunaison), en présentant toujours la même face (en première approximation, nous négligerons la libration). La Terre tourne sur elle-même en 24 heures (durée du jour) et autour du Soleil en 365,242 jours (année tropique ou année des saisons). Ces grandeurs sont mesurées par rapport à la ligne Terre-Soleil

Comment voir la Terre depuis la Lune ? La Lune présentant toujours la même face à la Terre, depuis un point quelconque de la Lune, la position de la Terre sera fixe dans le ciel. On doit donc se placer sur ce qu'on a longtemps appelé "la face connue de la Lune". Si on est au centre de cette face, on verra toujours la Terre au zénith et si on est au bord de cette face, on verra toujours la Terre à l'horizon. On voit parfois des photos de la NASA légendées "lever de Terre sur la Lune", ou "coucher de Terre sur la Lune". De telles légendes sont fausses. Si on veut que la Terre se déplace dans le ciel lunaire, il faut que l'engin spatial se déplace, de la même façon que le Petit Prince sur sa planète déplaçait sa chaise quand il voulait voir un coucher de Soleil.

### Quel est l'aspect de la Terre vue de la Lune ?

Supposons donc que nous sommes à un bon endroit sur la Lune. Nous avons vu que les phases de la Terre vues de la Lune sont l'inverse des phases de la Lune vues de la Terre. Par rapport à la Terre, nous avons l'avantage que, par suite de l'absence d'atmosphère sur la Lune, le ciel est noir et que la Terre éclairée sera visible sans interruption, sans l'alternance nuit-jour. Donc la Terre est vue plus ou moins éclairée et présente des phases suivant un cycle de 29,5 j... Au cours de ces phases la Terre apparaît comme un fin croissant, grossit jusqu'à apparaître comme une demi-Terre, en son premier quartier, et continue à grossir jusqu'à la pleine Terre. Ensuite, elle diminue, devient gibbeuse jusqu'au dernier quartier, et se présente de nouveau comme un croissant jusqu'à la nouvelle Terre.

Au cours d'un de ces cycles, la Terre apparaîtra successivement sur un fond d'étoiles correspondant aux différentes constellations du zodiaque. Il faudra simplement, pendant le jour lunaire éviter de regarder le Soleil dont la lumière est encore beaucoup plus dangereuse que sur Terre puisqu'elle n'est pas filtrée par une quelconque atmosphère.

Et pourtant elle tourne...

Pendant que la Terre tourne en son cycle de 24 heures, les différentes parties de la Terre font successivement face à la Lune. On verra donc tantôt des océans, qui occupent beaucoup de place sur la surface du globe terrestre, tantôt des continents, et ceci quelle que soit la phase de la Terre.

Donc, vous ne serez pas surpris lors de votre prochain séjour sur la Lune et vous pourrez faire un cours explicatif à vos compagnons de voyage. ■



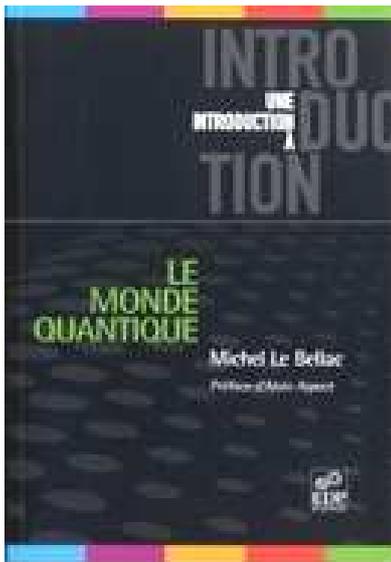
# LECTURES POUR LA MARQUISE

Christian Larcher

## Le monde quantique

Michel Le Bellac EDP Sciences (2010)

Ce livre est d'une grande richesse. L'auteur en propose une lecture à deux niveaux différents. L'un qu'il qualifie de "grand public" "se borne *"à une description qualitative des phénomènes quantiques, mais n'essaie pas véritablement d'expliquer les règles qui les régissent. Le second niveau qui est visé par le présent ouvrage, est plus ambitieux, mais aussi plus exigeant, dans la mesure où il s'efforce de répondre à la question "comment ça marche ?" tout en faisant appel au minimum de formalisme"*.



Le livre comprend 10 chapitres.

Le premier, particulièrement détaillé, contient 41 pages. Il est important pour accéder à la suite de l'ouvrage. Son objectif est de décrire le principe de fonctionnement d'un interféromètre de Mach-Zehnder c'est-à-dire d'un interféromètre à 2 voies comprenant 2 miroirs réfléchissants et 2 lames semi-réfléchissantes. Sur les lames semi-réfléchissantes une partie de la lumière laser est transmise et une autre réfléchie. À la sortie les deux faisceaux peuvent interférer.

C'est aussi un moyen d'introduire les amplitudes de probabilité et le principe de superposition. C'est enfin l'occasion de montrer les différences

essentielles entre la physique quantique et la physique classique.

En physique classique les probabilités de transmission ou de réflexion sont connues, l'utilisation des probabilités résulte de la complexité des phénomènes. On ne connaît pas le sort individuel de chaque photon mais cela n'a pas d'importance. Par exemple quand on tire à pile ou face on pourrait théoriquement prévoir le résultat si l'on avait une connaissance parfaite de tous les paramètres qui interviennent (caractéristiques du lancé, résistance de l'air, configuration du sol etc.). Quelles que soient les péripéties individuelles de chaque lancé on sait que, pour un grand nombre d'essais, on obtient toujours une probabilité de 50 % pour chacune des faces. En théorie classique les différents paramètres existent même si l'on est incapable de les déterminer. En physique quantique l'utilisation des probabilités n'est pas là pour masquer notre ignorance des détails. Par exemple une connaissance précise des conditions initiales n'apporte aucune information sur le comportement ultérieur. Cet aspect irritait particulièrement Albert Einstein qui était persuadé qu'il devait y avoir des *paramètres cachés*.

Dans les expériences modernes on peut utiliser des sources lumineuses capables d'émettre des photons isolés, véritablement uniques, émis à la demande.

La physique quantique présente des aspects déroutants. Par exemple si l'on cherche à mesurer la position d'un objet quantique, alors *"on le trouvera en un point d'espace avec une certaine probabilité, mais cela ne donne aucune indication sur sa position avant la mesure (...)"*. La mesure ne permet pas d'obtenir des informations sur une réalité préexistante et la notion de trajet emprunté par un photon perd toute signification. L'autre aspect déroutant concerne le principe de superposition des états quantiques. Ce principe est fondamental en physique quantique. Un objet quantique peut se trouver *"dans un état de superposition linéaire de deux ou plusieurs états quantiques"*.

Ainsi dans le cas de l'interféromètre cité le photon se trouve dans un état de superposition linéaire **des deux trajets**. Pour reprendre l'exemple célèbre du chat de Schrödinger il faut admettre qu'avant d'ouvrir la boîte l'animal est dans un double état à la fois mort et vivant.

Richard Feynman disait : *"les objets quantiques sont complètement cinglés, mais au moins le sont-ils tous de la même façon"*

Le deuxième chapitre traite de la cryptographie quantique, le troisième du paradoxe EPR (Einstein, Podolsky, Rosen) dans le cas des photons intriqués en polarisation et de l'expérience d'Alain Aspect.

Le chapitre 4 est intéressant il aborde le cas d'une particule dans une boîte à une dimension ainsi que des inégalités de Heisenberg. L'auteur indique clairement que ces inégalités ne sont en aucun cas liées aux imprécisions expérimentales mais *qu'elles sont intrinsèques à l'état quantique. Elles fixent les limites d'utilisation des concepts classiques de position et de vitesse.* La deuxième partie du chapitre est consacrée à l'interaction lumière-matière et au fonctionnement des lasers.

Dans le chapitre 5 après une étude détaillée du concept de température on aborde les techniques de refroidissement des atomes et le principe de fonctionnement des horloges atomiques le chapitre

s'achève avec les atomes ultras froids et les condensats de Bose-Einstein. Les derniers chapitres abordent des applications existantes ou possibles comme les semi-conducteurs et les ordinateurs quantiques. Le chapitre 7 concerne la physique quantique et les relativités.

Ce livre est passionnant mais on ne peut pas le considérer comme une introduction "grand public" au monde quantique. Malgré ce qu'indique l'auteur il paraît très difficile de le lire comme une description qualitative des phénomènes quantiques. L'aspect formelle et mathématique est présent dans presque tous les chapitres et ce ne sont pas les annexes qui suffisent à donner les bases formelles nécessaires.

En définitive cet ouvrage apparaît plutôt comme un condensé d'un autre livre de Michel Le Bellac intitulé "physique quantique" qui est également édité chez EDP sciences qui fait référence en la matière mais qui est trois fois plus conséquent. ■

# XVIII<sup>e</sup> OLYMPIADE DE PHYSIQUE

## "Herculina est en forme ..."

Pasquier Corentin, Coislier Titouan, Livet Florian,  
Lycée Léonard de Vinci de Montaigu

*Lorsque nous regardons un astéroïde à travers un télescope, nous ne pouvons pas distinguer sa forme. Une des seules informations pouvant être récupérée est sa luminosité, et plus précisément sa variation de luminosité en fonction du temps. La démarche consiste à trouver un lien entre forme et courbe de luminosité d'un astéroïde. Ce projet fut présenté aux Olympiades de Physique 2011 au Palais de la Découverte à Paris et a remporté un premier prix ainsi qu'une qualification pour le concours international Intel ISEF à Los Angeles en mai 2011.*

### **Quelques généralités sur les astéroïdes**

La découverte des astéroïdes remonte au début du XIX<sup>e</sup> siècle, mais leur étude ne prit un grand essor que lors de l'arrivée de l'informatique dans l'astronomie.

Il existe trois grands types d'astéroïdes : les carbonés "C", les silicatés "S" et les métalliques "M" (respectivement 75%, 17% et 5% de présence dans le système solaire). Ils peuvent mesurer de 10 à 1 000 000 de mètres. Ils ont une période de rotation autour du Soleil, ainsi qu'une période de rotation sur eux-mêmes, faisant varier leur luminosité.

On trouve environ 200 000 astéroïdes dans le système solaire (500 000 connus et 400 000 inconnus), principalement dans la ceinture principale et dans la ceinture de Kuiper.

### **L'étude d'astéroïdes centimétriques**

Étant donné qu'un des seuls moyens d'étudier la forme d'un astéroïde est d'étudier sa courbe de luminosité, on peut la comparer avec celles de modèles de petites tailles. Le principe était de créer un montage pour essayer de représenter au mieux la réalité. On y trouve donc une lampe (le Soleil), un modèle (un astéroïde), un tournebroche faisant tourner le modèle et une webcam (l'observateur sur la Terre).

## Le montage

La webcam filme la rotation du modèle dans une pièce sombre pour éviter toute perturbation. On obtient une petite vidéo (5 minutes avec 5 images par seconde) et avec le logiciel IRIS, nous permet de récupérer une courbe de luminosité. Le principe est simple, on indique la position du modèle et le logiciel va traiter les images pour récupérer la variation de luminosité du petit astéroïde. Il ne reste plus qu'à faire apparaître la courbe de luminosité grâce à un tableur, avec en abscisse le temps et en ordonnée la variation de luminosité.



Montage réalisé dans une maison.

## Les modèles

Le point clé de ce montage est sans doute le modèle d'astéroïde. En effet, comme c'est le seul paramètre que l'on change entre toutes les mesures, ce sont uniquement les modèles qui peuvent modifier l'allure des courbes. Ainsi, les modèles sont classés en deux catégories : les formes géométriques et les formes de "pommes de terre". L'avantage des formes géométriques se trouve dans le fait que les modèles ont un aspect accentué (comme un cône dont une extrémité est allongée) Comparer les courbes entre elles et trouver le lien entre les courbes et les formes devient donc plus facile. Cependant, il est peu probable de trouver un astéroïde de forme cubique dans l'espace, c'est pourquoi on a aussi utilisé des pommes de terre, car leur forme aléatoire rappelle celle des astéroïdes. En ce qui concerne le matériau utilisé pour réaliser les modèles, la première solution retenue fut le polystyrène, car c'est un matériau solide et facile à conserver. Cependant, on ne peut ni modifier, ni réparer ces modèles. C'est pour cela que, sur les conseils d'un astronome travaillant à l'observatoire de l'université de Genève, M. Behrend, la solution finale utilisée fut la pâte à modeler. Comme son nom l'indique, elle permet plus facilement de modeler, mais aussi de modifier ou de réparer les modèles. Pour ce qui est de la texture, on a recouvert les modèles d'aluminium. En effet, on veut récupérer la lumière réfléchiée par les modèles, or l'aluminium réfléchit très bien la lumière, donc c'est un bon point. De plus, l'aspect rugueux du papier aluminium froissé est semblable aux cratères présents à la surface des astéroïdes.



Exemple de modèle (huit).

## L'étude de vrais astéroïdes

Après avoir terminé les expériences sur les modèles, place aux expériences réelles. Il faut récupérer les images d'un astéroïde pour pouvoir comparer sa courbe de luminosité à celles de nos modèles. Le principe est simple, on prend des photos de l'astéroïde pendant une nuit à l'aide d'une caméra CCD branchée sur un télescope Celestron (Schmidt-Cassegrain de 2 m de focale avec un réducteur 3,3). Ensuite, le logiciel Iris va permettre de faire le prétraitement et le traitement des images pour ainsi obtenir la courbe de luminosité de l'astéroïde observé.

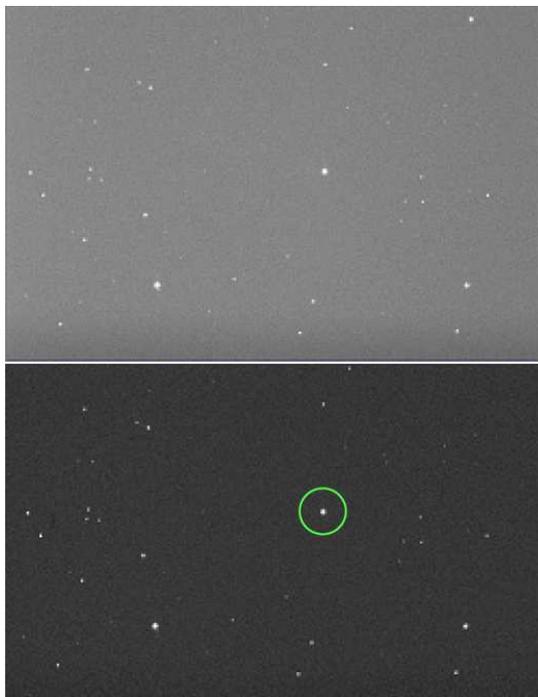


Télescope et caméra CCD utilisés.

## Le prétraitement et le traitement des photos

Il y a deux étapes pour obtenir la courbe de luminosité : le prétraitement et le traitement. Le prétraitement consiste à supprimer les défauts du montage (télescope et caméra CCD). Il existe trois défauts : le premier est causé par les pixels morts ou chauds de la caméra CCD, le second par sa chaleur interne de la caméra CCD et le dernier par des défauts optiques de l'ensemble du montage. Les deux premiers défauts sont des "bruits additifs" et le troisième un "bruit multiplicatif", il faudra donc

soustraire les deux premiers bruits et diviser par le dernier. Après la phase de prétraitement vient la phase d'alignement des images. En effet, pendant la nuit d'observation, le télescope et la caméra CCD vont bouger (par la vibration de nos pas, le vent, etc.), on va par exemple récupérer une partie d'une image en haut et en perdre une autre en bas, les images seront décalées. Le principe est simple, on indique au logiciel IRIS une étoile et il va se charger d'aligner les images. Vient ensuite le traitement des photos, qui consiste à récupérer la luminosité de l'astéroïde à partir des photos de celui-ci. Le principe est sensiblement le même que pour les modèles, à la seule différence qu'on doit indiquer la vitesse de déplacement en X et en Y de l'astéroïde étant donné que celui-ci se déplace dans le ciel. Il faut aussi prendre la luminosité de plusieurs étoiles de référence pour l'étape suivante.



Différence entre une image non prétraitée (en haut) et une image prétraitée et alignée (en bas), Herculina est entouré.

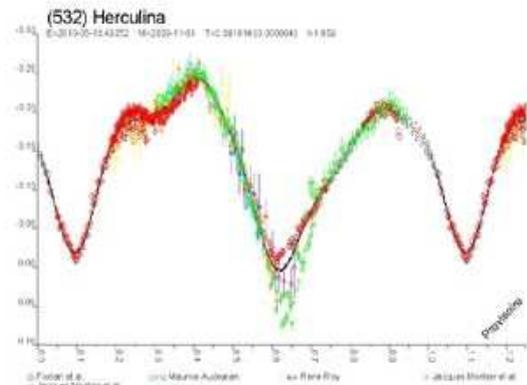
### La "super-étoile"

Après ces deux phases assez complexes, il reste une dernière étape, la "super-étoile". Pendant la nuit, des perturbations atmosphériques vont gêner la capture des images, que ce soit un avion ou un nuage (dans notre cas, principalement à cause du volcan Eyjafjöll). Il faut donc enlever ces défauts. On va d'abord faire un premier graphique pour s'assurer que les étoiles de références sont bien des étoiles et non d'autres objets célestes. Une étoile possède une luminosité constante : une courbe de luminosité plutôt rectiligne est donc représentative

d'une étoile. Une fois que nous nous sommes assurés que les étoiles en sont bien, nous allons faire la moyenne de la luminosité de toutes ces étoiles pour chaque image (c'est la "super-étoile") et nous allons soustraire cette moyenne à la luminosité de l'astéroïde, enlevant ainsi les défauts de l'atmosphère et donnant une courbe de luminosité plus précise.

### La vérification.

Une fois ceci fait, nous avons fait vérifier nos données sur l'astéroïde "(532) Herculina" par M. Behrend. Il a souhaité faire son prétraitement et son traitement seul et le premier verdict fut bon, mais quelques jours plus tard, M. Behrend nous a mentionné un problème : notre courbe ne correspondait absolument pas à celle de 2004. Il a donc demandé à d'autres astronomes amateurs de faire leur propre courbe, or celles-ci coïncidaient bien avec la nôtre. M. Behrend a donc publié notre courbe sur son site avec nos noms, elle est reconnue par la communauté astronomique. Reste cependant un dernier problème, un des puits de la courbe varie fortement selon les différentes données, Herculina est donc passé en objet provisoire et fait encore l'objet de recherches par les astrophysiciens.



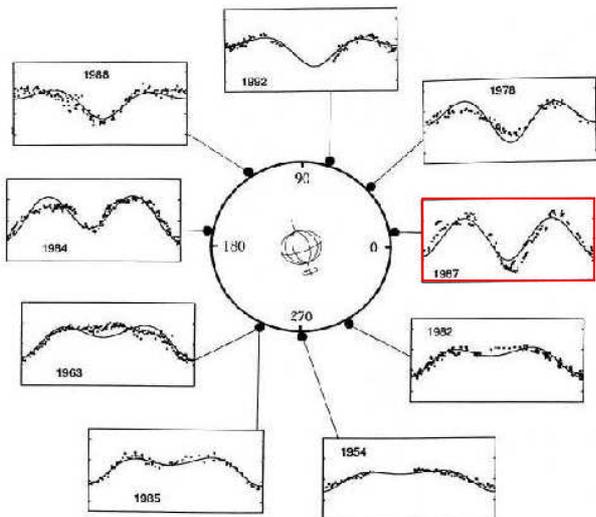
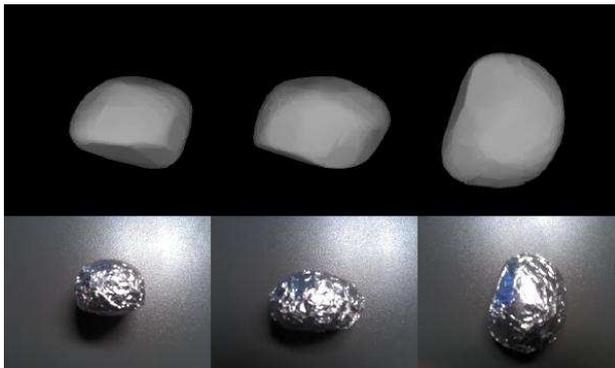
Courbe finale de (532) Herculina, nos points sont en rouge, les autres correspondent aux mesures des amateurs.

### La comparaison impossible.

Une fois assurés de la validité de la courbe de luminosité de Herculina, il fallait faire le lien avec le travail fait en laboratoire. Le principe était simple : comparer la courbe de luminosité de Herculina avec celles des modèles. Après de multiples tentatives de comparaison, le même problème revenait : aucune courbe ou partie de courbe ne correspondait à la courbe de luminosité de Herculina. Il fallait s'en douter, on ne peut trouver un astéroïde en forme de cube ou de tétraèdre dans l'espace.

## L'intervention de M. Fauvaud.

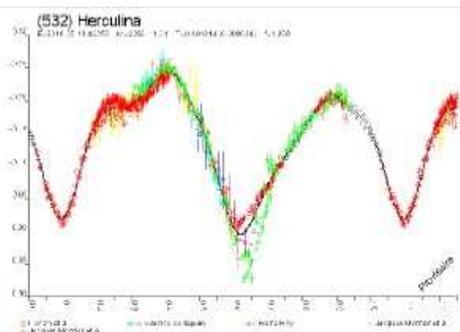
A la suite de ce problème, M. Fauvaud, un astronome amateur très averti, nous a fait une conférence de deux heures sur le principe de photométrie et aussi sur les possibilités de modélisation en trois dimensions des astéroïdes grâce à leurs courbes de luminosité. Cet astronome est en contact avec des chercheurs polonais, qui, grâce à un logiciel très sophistiqué, peuvent modéliser un astéroïde avec un ensemble de courbes de luminosité. Il nous a donc fourni un document où se trouve une modélisation de Herculina réalisée par ces chercheurs.



Modèles d'Herculina en haut et schéma de correspondance courbe angle en bas. Encadrée en rouge la courbe qui ressemble à celle obtenue lors de nos observations.

Ce document nous montre aussi un schéma sur lequel on peut voir un lien entre une courbe de luminosité et un angle. Cet angle se trouve être en fait l'angle formé par l'axe de rotation de l'astéroïde et la perpendiculaire au plan de l'écliptique. En effet, au cours du temps, cet angle

varie, et modifie la courbe de luminosité de Herculina. L'ensemble des courbes présentes sur le schéma ci-dessus, a été obtenu sur une période de 25 ans. Nous avons donc décidé de reproduire Herculina en pâte à modeler (à partir du modèle présent sur le document), et de placer ce modèle dans notre montage en modifiant l'angle entre la broche (axe de rotation) et la perpendiculaire au sol (plan de l'écliptique). Sur le schéma, la courbe la plus semblable à la nôtre se trouve être la courbe de 1987, qui correspond à un angle de 5 degrés. La courbe obtenue correspond très fortement avec celle réalisée sur Herculina, nous avons donc fait le



lien entre laboratoire et mesures réelles.

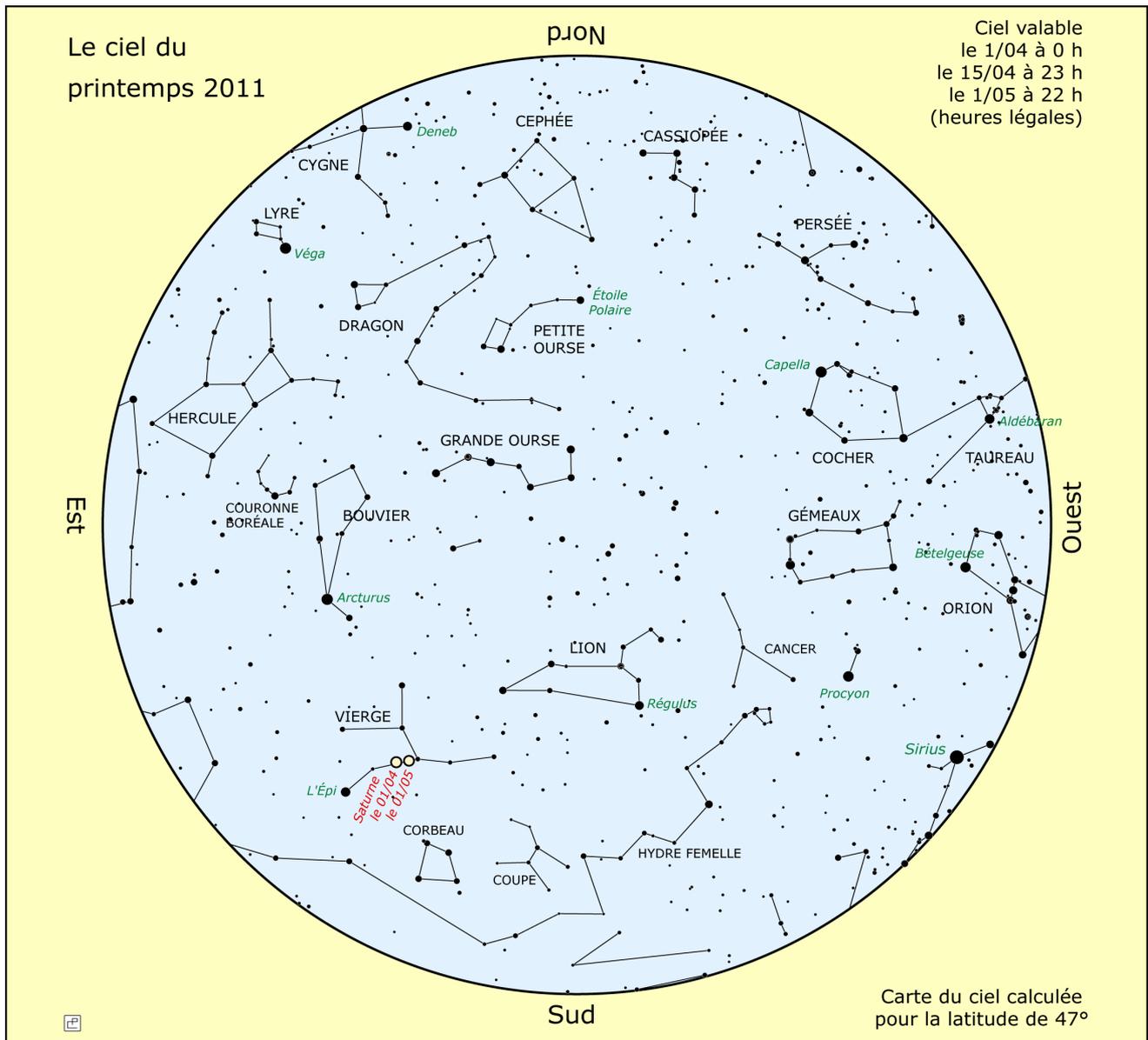
Comparaison entre les deux courbes : modèle d'Herculina en haut et Herculina en bas.

### Herculina : un objet particulier ...

Malgré l'obtention de la forme de Herculina, un problème revenait au niveau du puits de lumière qui ne correspondait à aucune courbe. Après diverses études et l'intervention lors de notre présentation aux Olympiades de physique de Lucie Maquet, une étudiante en astrophysique (en dernière année de thèse), nous savons que Herculina possède son propre satellite. La méthode par "occultation" a permis de déterminer les propriétés du satellite : son diamètre est de 50 km alors que celui de Herculina est de 217 km ; la distance le séparant de Herculina est de 975 km. Cet astéroïde est en fait un système double. ■

# Le ciel du printemps 2011

Document à photocopier



## Visibilité des planètes

**Saturne** est à l'opposition le 3 avril et sera donc visible toute la nuit au printemps (voir page 10).

**Vénus** est encore visible le matin à l'est mais c'est la fin de sa période de visibilité.

**Mercur**e sera observable le soir fin mars à l'ouest (élongation maximale le 23/03) puis le matin mais plus difficilement début mai (élongation maximale le 7/05).

**Jupiter** passe derrière le Soleil le 6 avril et est donc inobservable dans de bonnes conditions.

## Quelques événements

20 ou 21/03 : Équinoxe de printemps le 20 à 23 h 20 en heure TU ou le 21 à 0 h 20 en heure légale.

27/03 : Passage à l'heure d'été. On passe du Temps Universel Coordonné (TUC ou UTC) + 1 h à UTC + 2 h.

31/03 (matin) : Conjonction Lune Vénus.

03/04 : Opposition de Saturne.

06/04 : Conjonction supérieure de Jupiter.

11/05 : Rapprochement Vénus Jupiter Mercure à rechercher le matin à l'est, 30 minutes avant le lever du Soleil donc très bas sur l'horizon.

01/06 : Éclipse partielle de Soleil visible depuis l'Islande, le nord de l'Amérique et la Sibérie.

15/06 : Éclipse totale de Lune visible le soir depuis la France (voir page 40).

21/06 : Solstice d'été à 19 h 16.

## Lune

Pleine Lune : 18/04, 17/05, 15/06.

Nouvelle Lune : 3/04, 3/05, 1/06.

Périgées le 17/04, 15/05, 12/06.

# LA VIE ASSOCIATIVE

## Assemblée Générale du CLEA

Bordeaux, locaux de Cap Sciences, CCSTI d'Aquitaine

Jean-Luc Fouquet

### 1. Rapport moral.

#### 1.1. Vie associative

Une organisation différente du travail a peu à peu été mise en place. Jean-Michel Vienney a pris la responsabilité du groupe. Il s'agit de dynamiser le rôle des correspondants académiques pour une meilleure lisibilité des activités du CLEA au niveau du territoire, de permettre à des anciens d'aider de nouvelles bonnes volontés et aussi d'encourager la formation initiale des enseignants localement, en particulier pour les débutants.

#### 1.2. Productions pédagogiques

Pierre Causeret a pris la charge du groupe. L'effort a été porté sur les nouveaux programmes de seconde, avec la mise en ligne de nombreux documents sur le site du CLEA basé à Lyon. Les programmes de 1<sup>S</sup> sont parus et peuvent aussi permettre quelques apports documentaires et pédagogiques en astronomie.

#### 1.3. Les Cahiers Clairaut

L'équipe tourne à plein.

#### 1.4. Les écoles d'été

Une équipe nouvelle s'occupera de l'organisation, avec Danièle Imbault à sa tête. Convivialité et disponibilité font la force de ces stages.

#### 1.5. Sites internet

C'est désormais un vrai outil de mise en ligne des ressources pour les enseignants, qui permet aussi indirectement de mesurer l'impact de nos productions.

#### 1.6. Communication interne

Il faut rechercher une meilleure efficacité au niveau de la communication des membres du bureau. Se voir plus souvent permettrait de produire mieux.

#### 1.7. Ventes

Une transition entre l'observatoire de Lyon et la faculté de Paris-Diderot commence à se mettre en place.

#### 1.8. Siège social

Une "Maison de l'enseignement" va voir le jour à Paris-Diderot. Le CLEA pourrait y organiser une vitrine, avec point de vente et secrétariat, ce qui de plus pourrait permettre d'établir une convention pour la disposition des locaux à Paris pour la prochaine assemblée générale. La transition pour ces transformations serait assurée par Dominique Bernard à Lyon.

#### 1.9. Les tarifs

Ce point a déjà été présenté dans le précédent numéro.

### 2. Rapport financier (Jean Ripert) voir annexe-2

#### 2.1. Les tarifs des Cahiers Clairaut

Un cahier revient à peu près à 2400 euros par tirage. Une proposition d'une baisse du prix est faite.

#### 2.3. Les abonnements

Depuis la rentrée scolaire, il y a eu plus de nouveaux abonnés que les années précédentes (programme de seconde ?).

#### Discussion:

a) Quatre cotisations n'ont pas été payées par la société d'abonnement Swets. Les abonnés n'ont pas été pénalisés, le CLEA continue d'assurer les livraisons. Il faudrait dénoncer le procédé mis en place auprès d'associations de consommateurs.

c) Lucienne Gouguenheim pense que l'on peut déclarer aux impôts le versement de dons au CLEA (article 200 du code des impôts). De plus, un "abonnement de soutien" pourrait être ajouté aux propositions de tarifs.

#### Vote sur le rapport moral: adoption à l'unanimité.

Vote sur le budget: le quitus est donné au trésorier à l'unanimité et tarifs adoptés par 104 voix et une abstention.

### 2. Élections pour le Conseil d'Administration du CLEA voir annexe 1

Trois conseillers sortant n'ont pas confirmé leur candidature, deux ont souhaité quitter le CA. Cinq nouvelles candidatures sont proposées: Bernard Grauss, Claire Lelay, Roseline Jamet, Cécile de Hosson et Béatrice Sandré.

Un vote à bulletin secret est organisé pendant la pause. À la fin de la matinée, après dépouillement pour 105 votants, il est annoncé que **tous les membres du Conseil sont élus à l'unanimité (voir Annexe)**

### 3. Vie associative (Jean-Michel Vienney)

La présentation commence par une rapide présentation des actions entreprises dans les académies (22 académies sur un total de 32 ont un correspondant académique) les salons et congrès.

*Comment rendre la communication encore plus vivante?*

Évocation de "l'atelier CORAC", réunion qui a été organisée le 20 mars 2010, avec pour objectifs : - promouvoir l'échange entre correspondants ; - établissement d'un vade-mecum du correspondant académique, et organisation de l'aide ; à apporter aux nouveaux correspondants ; - organisation d'un "partage d'idées" pour faire rayonner le CLEA.

Cécile Ferrari précise les actions déjà entreprises pour le PAF, avec un partenariat entre CLEA et Université dans des académies pilotes, avec Pierre Causeret à Dijon, Roseline Jamet à Bordeaux, Jean-Michel Vienney à Paris. Des expériences déjà conduites à Nice par Pierre Le Fur apportent une aide précieuse. Danièle Maurel cite les rencontres organisées à Buthiers entre enseignants des académies d'Orléans et de Versailles.

Gérard Hess présente une maquette du système solaire, réalisée par des élèves de BTS, dans l'académie d'Orléans.

## **5. Productions pédagogiques (Pierre Causeret)**

### **5.1. Nouveaux programmes de seconde**

De nombreux fichiers ont déjà été déposés sur le site, mais reste à résoudre le problème de la validation des documents proposés.

### **5.2. Hors série "école"**

Des fiches pédagogiques pour le cycle 3 ont été réalisées dans le Lot dans le cadre de l'AMA09. Ces fiches peuvent être utilisées par le CLEA pour réaliser un Hors série version « papier » + CD-ROM. Il faut essayer de développer le réseau CLEA – écoles primaires. *Éric Josselin* rappelle le bénéfice que l'on pourrait tirer d'une relation avec le réseau "la main à la pâte".

### **5.3. Hors série « constellations »**

Une version « papier + Cd-rom » est en préparation (légendes et apprentissage, cartes de toutes sortes et maquettes, logiciels et modes d'emploi). *Éric Josselin* évoque l'aide possible d'un archéoastronome spécialiste des mayas.

### **5.4. Hors série « Mathématiques et astronomie »**

Ce document a connu un gros succès et n'est plus disponible. Certains thèmes pourraient être insérés comme les magnitudes, les calendriers, les cadrans solaires, de même que pourraient être exploités des logiciels et des animations.

#### **Quelques remarques:**

*Cécile Ferrari*: Il faut prévoir, pour ces trois hors séries, un calendrier pour finaliser les produits avant l'été, avec réunions possibles à Paris pour mise en forme définitive.

*Lucienne Gouguenheim*: Il faut étudier et mettre en valeur les relations entre les programmes et les fiches proposées pour le hors série « mathématiques et astronomie ».

*Jean-Michel Vienney*: Une maquette qui montre le lien entre mouvement du Soleil et panneaux solaires a été montrée et elle paraît très intéressante. Elle pourrait être reprise et étudiée en fonction des programmes.

*Danièle Imbault*: 2011 sera aussi l'année internationale de la chimie. Il faudra consulter les sites de Science à l'école et du CERN pour être mieux informé.

*Éric Josselin*: En 2012, ce sera le centenaire de la détection des rayons cosmiques, événement qui pourrait susciter de nouvelles vocations, de nouvelles actions, de nouveaux adhérents.

*Jean Ripert*: La liste des adhérents par académie sera envoyée à chaque correspondant.

## **6. Écoles d'été**

*Cécile Ferrari*: Pour l'école d'été de 2011, professeurs des écoles et professeurs de lycée seront particulièrement visés dans l'élaboration du programme du stage.

## **7. L'écho du net (Charles Henri Eyraud)**

Est tout d'abord proposée une démonstration de l'utilisation du site de l'INRP. Les actualités seront supprimées sur le site de Nice et intégrée sur le site de Lyon. Cette page deviendra collaborative, et tous les adhérents pourront présenter des activités académiques ou locales.

Suivent ensuite des études statistiques comparées sur les années 2009 et 2010. On remarque en particulier une augmentation de la fréquentation de 40%, particulièrement depuis la mi-septembre, probablement à cause du nouveau programme de Seconde.

## **8. Remerciements aux organisatrice de cette Assemblée générale: Liliane et Roseline.**

**Deuxième partie de l'Assemblée générale: reprise des débats à 14h20.**

## **9. Actualités du CLEA:**

### **9.1. Salon et congrès**

Le CLEA y tient régulièrement des stands au salon des jeux mathématiques aux Journées Nationales de l'UDPPC.

### **9.2. Les futurs programmes de 1<sup>S</sup>**

Un appel d'offre est lancé pour étudier ces nouveaux programmes qui doivent entrer en vigueur à la rentrée 2011 en sciences physiques, et repérer les chapitres sur lesquels le CLEA pourrait exercer pleinement ses compétences.

## **10. Conférence:**

**« Dernières nouvelles des étoiles avec Herschel »**

**par Fabrice Herpin, astronome au Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux.**

**Annexe 1 Liste des membres du Conseil d'Administration :** Acker Agnès (astronome Strasbourg), Balin Dominique (Île de France), Bardin Daniel (Provence Alpes Côte d'Azur), Berthomieu Francis (Provence Alpes Côte d'Azur), Billard Francine (Champagne Ardennes), Bobin Michel (Île de France), Brahic André (Astronome, Île de France), Briot Danielle (Astronome, Île de France), Causeret Pierre (Correspondant Dijon), Cavaroz René (Correspondant Basse Normandie), Chaty Sylvain (Astronome Champagne Ardennes), De Hosson Cécile (chercheuse, Île de France), Duval Marie-France (Astronome Provence Alpes Côte d'Azur), Eyraud Charles-Henri (Rhône-Alpes), Ferrari Cécile (Astronome, Île de France), Fouquet Jean-Luc (correspondant Poitou-Charente), Garreau Brigitte (Aquitaine), Gayraud Olivier (Correspondant Midi Pyrénées), Grauss Bernard (Champagne Ardennes), Hauguel Véronique (Haute Normandie), Imbault Danièle (CEA Saclay), Jamet Roseline (correspondante Aquitaine), Josselin Éric (Astronome Correspondant Languedoc Roussillon), Jouguelet Éric (Correspondant Créteil), Lahellec Marie-Agnès (Île de France), Larcher Christian (Correspondant Paris), Le Fur Pierre (Correspondant Nice), Le Lay Claire (La Réunion), Lecoutre Chantal (Rhône Alpes), Lecoutre Georges (Rhône Alpes), Maurel Danièle (Correspondante Pays de Loire), Meunier Roger (Île de

France), Muller Lionel (Correspondant Strasbourg), Paupart Daniel (Aquitaine), Pecker Jean-Claude (Astronome, Île de France), Petit Jean (Midi-Pyrénées), Ripert Jean (Midi-Pyrénées), Sert Josée (Midi-Pyrénées), Vienney Jean-Michel (correspondant Versailles), Sandré Béatrice (Midi-Pyrénées).

**Annexe 2 : Comptes de résultat nov 2009 à nov 2010**

**CLEA Dépenses du 29 novembre 2009 au 21 novembre 2010**

**Compte Courant Banque Postale**

Cahiers Clairaut : **10 323,94** ; Communication : **593,18** ; A G nov 2009 : **2 481,40** ; Assurance : **316,14**  
Fonctionnement : **2 895,33** ; EEA 2010 : 12689,09 ; Divers : 1 789,96

**TOTAL : 31 089,04 €**

**CLEA Recettes du 29 novembre 2009 au 21 novembre 2010**

**Compte Courant Banque Postale**

Cahiers Clairaut : 13105,00 ; Adhésions : 2165,00 ; Ventes : 2776,00 ; centre Fr photocop : 202,72  
EEA 2010 (37 présents : 9962,60 ; AG 2009 : 1342,00

**SOUS-TOTAL : 29 553,32**

**Livret en 2009**

Intérêts : 1 308,85

**TOTAL Recettes : 30 862,17**

Pour l'année, déficit de **31 089,04 - 30 862,17 = 226,87 €**

**Solde en novembre 2009 : 73881,87**

**Solde en novembre 2010 : 73881,87 - 226,87 = 73655,00 €**

**Rapprochement**

Relevé CCP 6 nov 2010 : 2 393,56 ; relevé livret nov 2010 : 70 835,75 ; **TOTAL : 73 229,31 €**

Recettes non encaissées : 765,00 ; dépenses nos débitées : 339,31

Donc en caisse : 73 229,31 + **765,00 - 339,31 = 73 655,00 €**

## 15 juin 2011 : une éclipse totale de Lune bien programmée

Visible en début de soirée à une époque où les nuages sont souvent absents, cette éclipse totale de Lune sera facile à observer. Seul petit inconvénient en France métropolitaine, nous raterons le début du phénomène qui se passera alors que la Lune ne sera encore pas levée. Les personnes habitant à l'est d'une ligne Perpignan - Genève verront la Lune se lever avant le début de la totalité ; à l'ouest de cette ligne elle se lèvera totalement éclip­sée. Mais toute la deuxième partie de l'éclipse sera bien visible. Les habitants de la Réunion pourront voir l'ensemble du phénomène.

Les horaires (en heure légale française)

Entrée dans l'ombre : 20 h 23 Début de la totalité : 21 h 22

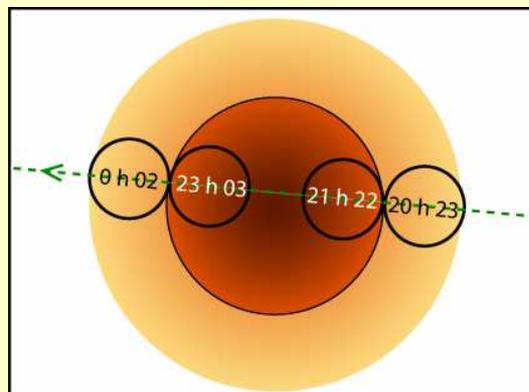
Maximum de l'éclipse : 22 h 13 Fin de la totalité 23 h 03

Fin de l'éclipse : 0 h 02

La Lune traversant la pénombre et l'ombre de la Terre le 15 juin 2011. Les heures sont en heure légale. On peut remarquer que la Lune passera quasiment au centre de l'ombre de la Terre. La totalité sera particulièrement longue (1 h 41). Pour que la durée d'une éclipse totale de Lune soit maximale, il faut non seulement que la Lune passe au centre de l'ombre de la Terre mais aussi qu'elle soit à l'apogée car sa vitesse est alors plus faible. Le maximum est de 1 h 46 (éclipse du 16 juillet 2000).

La Lune se lèvera au sud-est, l'azimut de son lever étant compris

entre 300 et 310° (soit 50 à 60° à l'est du sud). Il faudra donc prévoir un horizon dégagé de ce côté là.



|                         | Marseille | Lyon    | Strasbourg | Bordeaux | Paris   | Lille   | Brest   |
|-------------------------|-----------|---------|------------|----------|---------|---------|---------|
| <b>Lever de la Lune</b> | 21 h 15   | 21 h 27 | 21 h 27    | 21 h 45  | 21 h 51 | 21 h 57 | 22 h 17 |

Heure du lever de la Lune le 15 juin dans quelques villes de France (heure légale). Source IMCCE.

Pour plus de détails, site de l'IMCCE : <http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/phenomenes/eclipses/lune> (choisir juin 2011)

## Solutions des mots croisés.

### Horizontalement.

1. Aplatissement. 2. Ni. Gazeuse. UA (Saturne est à 8,6 Unités Astronomiques de la Terre fin mars 2011). 3. Noé. Latitudes.  
4. Encke. If. DI (Démarche d'investigation). 5. Aéronef. Hooke (Robert Hooke a observé les anneaux de Saturne et dessiné les ombres portées à la fin du xviii siècle). 6. uei. Ta. Bannier. 7. X-Ray. Uval. Ers.

### Verticalement

1. Anneaux. 2. Pioneer (Pioneer 11 fut la première sonde à survoler Saturne, en 1979). 3. Écria. 4. Ag. K.O. 5. Talent. 6. Iza. Eau.  
7. Sétif. 8. Suif. BA (les anneaux A et B sont séparés par la division de Cassini). 9. Est. Hal (dans le film 2001 l'odyssée de l'espace).  
10. Meudon. 11. Dioné. 12. Nue. Kir. 13. Tassées.

## Écoles d'Été d'Astronomie



Vous souhaitez débiter en astronomie ?

Vous souhaitez vous perfectionner ?

Vous avez le projet d'animer un club ?

Venez participer à une école d'été d'astronomie, au col Bayard, à 1 200 m d'altitude, dans un cadre prestigieux.



Des exposés accessibles à tous



Des ateliers pratiques et des observations

Toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

**Renseignements sur le site du CLEA**

## Les productions du CLEA <sup>(1)</sup>

*En plus du bulletin de liaison entre les abonnés que sont les Cahiers Clairaut, le CLEA a réalisé diverses productions.*

*Fruit d'expérimentations, d'échanges, de mises au point et de réflexions pédagogiques d'astronomes et d'enseignants d'écoles, de collèges, de lycées, ces productions se présentent sous différentes formes :*

### Fiches pédagogiques

Ce sont des hors série des Cahiers Clairaut conçus par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA : astronomie à l'école, la Lune, gravitation et lumière, mathématique et astronomie, ...

### Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

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

### Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction

### DVD

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

**Le formulaire de commande est sur le site.**

(1) vente aux adhérents uniquement

### Planétarium

Il est possible également de louer le planétarium gonflable (starlab) du CLEA. Cette année 2011, il sera en Région Midi-Pyrénées. (uniquement pour le planétarium contact : [jean.a.ripert@wanadoo.fr](mailto:jean.a.ripert@wanadoo.fr))

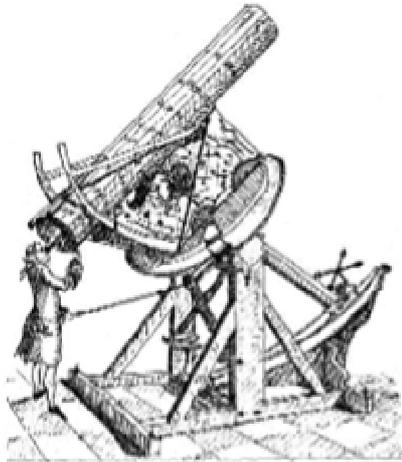
## Le site internet

**Une information toujours actualisée**

[www.clea-astro.eu](http://www.clea-astro.eu)



## LES CAHIERS CLAIRAUT



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

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

## COMMENT NOUS JOINDRE ?

Informations générales :

[www.clea-astro.eu](http://www.clea-astro.eu)

OU

[www.ac-nice.fr/clea](http://www.ac-nice.fr/clea)

**Siège Social :**

CLEA,  
Observatoire de Lyon  
69561 ST-Genis Laval CEDEX

**École d'Été d'Astronomie :**

[daniele.imbault@cea.fr](mailto:daniele.imbault@cea.fr)

**Cahiers Clairaut :**

[larcher2@wanadoo.fr](mailto:larcher2@wanadoo.fr)

**Ventes des productions :**

[www.clea-astro.eu](http://www.clea-astro.eu)

**Site internet :**

[berthomi@ac-nice.fr](mailto:berthomi@ac-nice.fr)  
[charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr](mailto:charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr)

### Adhésion / Abonnement :

|  |             |
|--|-------------|
| Adhésion CLEA pour 2011 :                            | <b>5 €</b>  |
| Abonnement CC pour 2011 :                            | <b>25 €</b> |
| Adhésion + abonnement CC :                           | <b>30 €</b> |
| Adhésion + abonnement CC<br>+ abonnement numérique : | <b>35 €</b> |

Chèque à l'ordre du CLEA, à envoyer à :  
Jean Ripert  
Impasse de Mouyracs  
46090 PRADINES

Directrice de la Publication : Cécile Ferrari  
Rédacteur de publication : Christian Larcher  
Imprimerie France Quercy 46090 MERCUËS

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979  
Numéro CPPAP : 0310 G 89368  
Prix au numéro : 7 €  
Revue trimestrielle : numéro 133, mars 2011