

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 (CH₄), 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 (N₂), 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 surface¹. La

¹ 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.

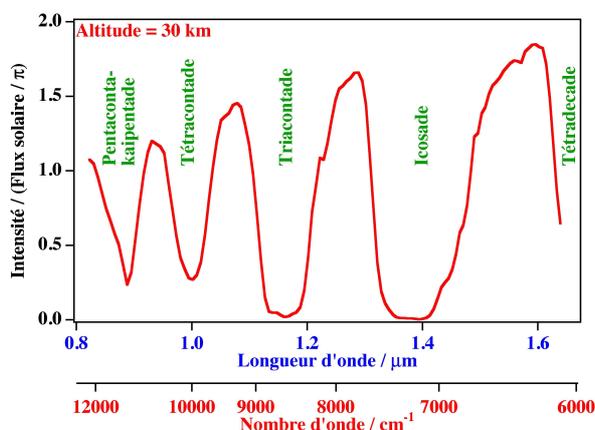


Fig.1. Spectre enregistré depuis une altitude de 30 km par la sonde Huygens lors de sa descente dans l'atmosphère de Titan, le 14 janvier 2005 (l'instrument regardant le Soleil). On voit clairement les fortes bandes d'absorption du méthane (dont les noms sont donnés en vert).

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 Jupiter², avant d'arriver enfin vers Saturne autour de laquelle elle se satellisa le 1^{er} 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.

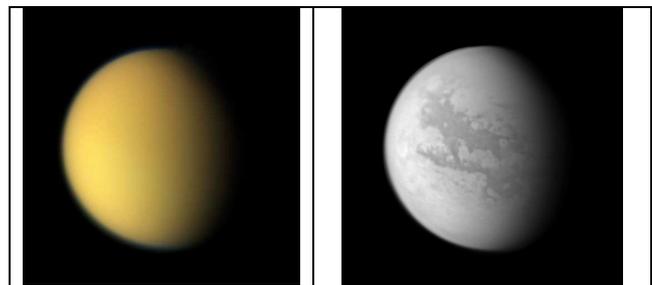


Fig.2. À gauche, vue de Titan en lumière visible, montrant l'atmosphère et sa brume organique orangée. À droite, vue infrarouge à 638 nm, révélant la topographie du sol. En effet, comme on peut le voir sur la figure 1, le méthane est relativement transparent dans cette région spectrale (Images JPL PIA06230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

² 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.

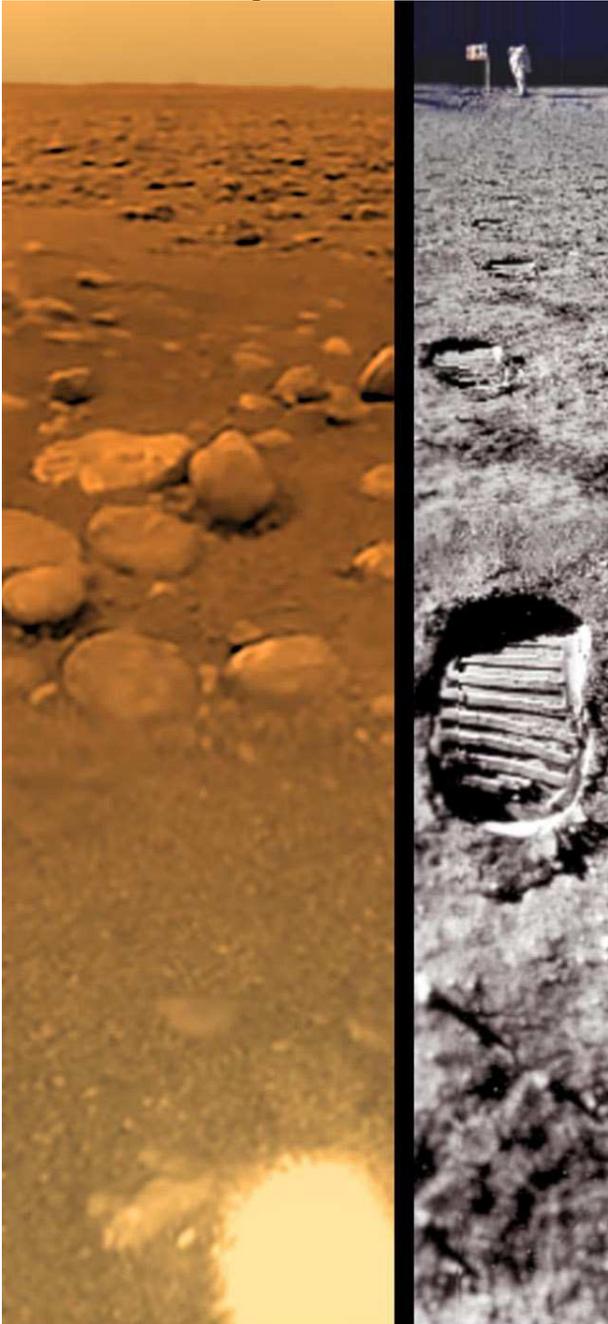


Fig.3. À gauche : image du sol de Titan prise par l'instrument DISR de la sonde Huygens le 14 janvier 2005. La vue de droite montre la surface lunaire prise lors d'une mission Apollo, à la même échelle (Image JPL PIA08115 – Crédit photo : NASA/JPL/Space Science Institute).

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°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.

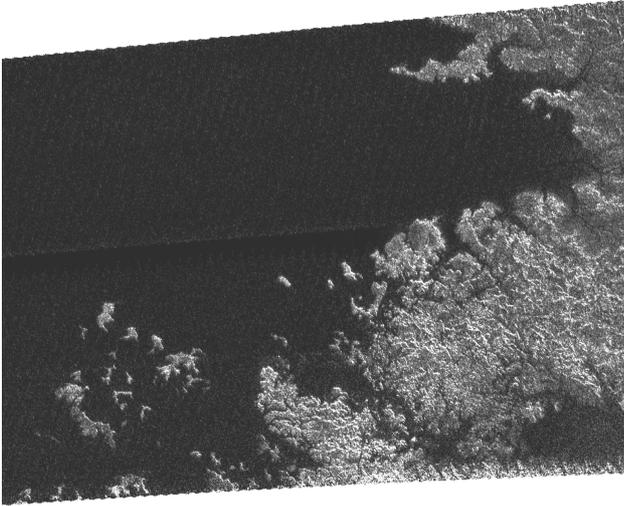


Fig.4. Image radar d'une région proche du pôle nord de Titan, prise par la sonde Cassini. L'étendue noire sur cette image est une partie d'un vaste lac de méthane et d'éthane liquides. L'image fait environ 270 km par 160 km, avec une résolution de 300 m (Image JPL PIA09211 – Crédit photo : NASA/JPL/Space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

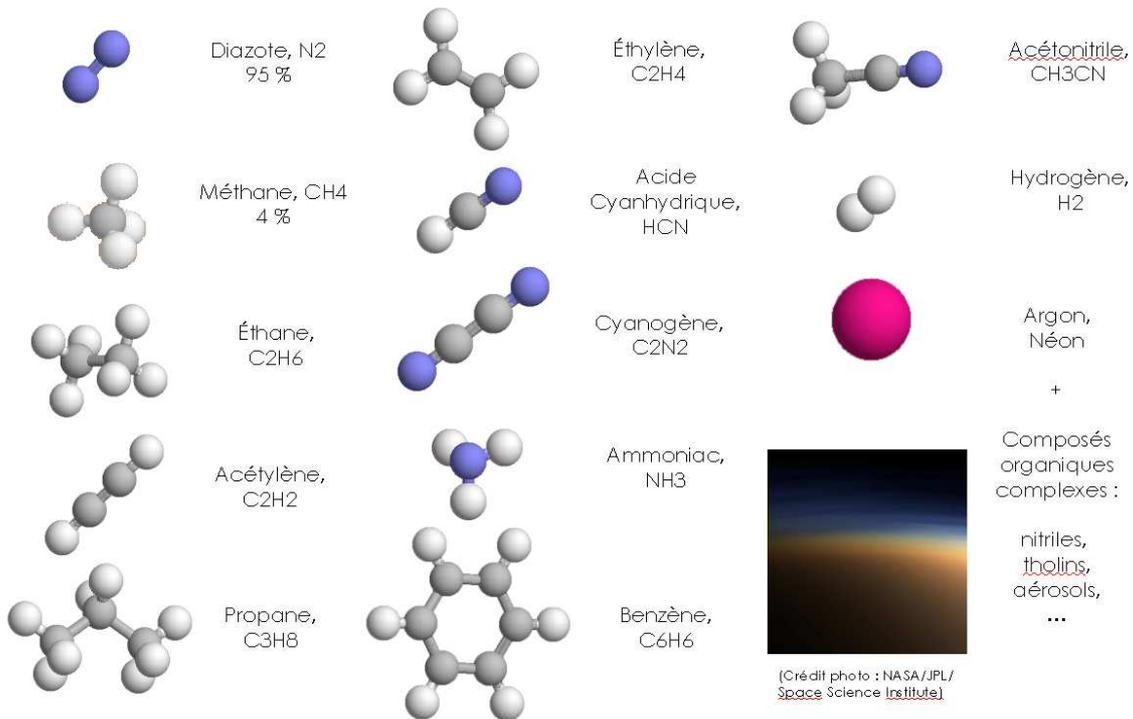


Fig.5. Les principaux composés chimiques de l'atmosphère de Titan. La photodissociation de CH_4 et de N_2 dans la haute atmosphère mène à toute une série de réactions chimiques produisant des composés organiques complexes regroupés sous le nom de tholins. Ils sont à l'origine de la brume orangée.

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 (NH_3) ainsi qu'avec des glaces d'hydrocarbures, principalement du méthane (CH_4) et de l'éthane (C_2H_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

**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.**