PHÉNOMÈNES DES SATELLITES GALILÉENS ET OBSERVATION DES CENTRES VOLCANIQUES DE IO

P. Descamps

1. Introduction

Avant toute chose, une question simple peut venir à l'esprit, pourquoi observer Io ?

Il est très largement connu maintenant que Io, le premier satellite galiléen, est le théâtre en son sein d'une extraordinaire activité énergétique qui se révèle en surface par l'existence d'un volcanisme actif et durable.

Depuis que ce fait a été mis en évidence par la sonde Voyager en 1979, les astronomes ont déployé des trésors d'énergie et d'imagination pour observer, étudier et comprendre les mécanismes internes en jeu. Les enjeux sont en fait multiples. Il s'agit de chercher à connaitre au mieux la distribution spatiale des centres volcaniques ainsi que leur évolution temporelle et de déterminer le flux de chaleur global qui se dégage de Io. Cette donnée a des implications à la fois dans la modélisation de la dissipation interne et, du point de vue dynamique, dans la détermination de l'accélération séculaire de Io dont la quantification demeure si controversée qu'on ne peut encore dire avec certitude si Io accélère ou décélère sur sa trajectoire (Vasundhara et al., 1996, Descamps, 1995, Lieske, 1987).

C'est pourquoi, les méthodes terrestres qui ont été mises en œuvre ont toutes pour objet d'accéder à la connaissance aussi précise que possible de la localisation spatiale du point chaud, de son flux, de sa température, de ses dimensions ainsi que la possibilité d'en obtenir une carte tomographique, c'est-à-dire une carte de la répartition bidimensionnelle du flux émanant de la région volcanique.

Au-delà de la méthode utilisée, certaines configurations astronomiques des satellites galiléens sont mises à profit pour faciliter la détection et l'observation des centres volcaniques. Ces configurations favorables sont les phénomènes et, en particulier, les occultations de Io par d'autres satellites galiléens. L'intérêt de telles observations est qu'elles constituent les seules opportunités permettant, avec des moyens de dimension humaine, de déterminer l'ensemble des données citées précédemment. Enfin, je dirai un mot de la technique de l'optique adaptative qui permet dès à présent de réaliser des observations de Io avec une résolution uniquement limitée par la diffraction du télescope et qui donc permet de s'affranchir de cette contrainte de recherche de configurations astronomiques favorables.

2. Contraintes principales pour les observations des hot spots

De manière générale, l'observation des points chauds (hot spots en langue conventionnelle) est soumise à des contraintes de deux types dont on ne peut faire l'économie: la très faible dimension angulaire des points chauds d'une part et leur détectabilité uniquement permise dans des longueurs d'onde de l'infrarouge proche.

2.1. *Haute résolution angulaire*

Les dimensions apparentes de Io sont typiquement de l'ordre de la seconde de degré, celles d'un "point" chaud de l'ordre de 0.05 secondes de degré (200km). On voit donc que si l'on veut résoudre un point chaud, par exemple à une longueur d'onde de 3.8μm, il est nécessaire de disposer d'un télescope de la classe des 16m ! Ceci pourra être le cas lorsque le projet VLT de l'ESO de télescope travaillant en mode interférométrique sera complètement opérationnel mais on en est loin pour le moment.

L'observation photométrique d'une occultation de Io permet d'atteindre cette résolution angulaire suivant une dimension, celle le long du mouvement relatif apparent du satellite occultant par rapport à Io. En effet, une mesure photométrique du flux en provenance des deux corps pendant la durée de l'occultation, avec un échantillonnage en temps de l'ordre de la seconde pour une vitesse relative typique de 20km/s, permet une résolution théorique de quelques kilomètres (0.005 secondes de degré).

2.2. *Nécessité d'observer dans le proche infrarouge*

Par rapport au reste de la surface de Io, les points chauds justifient leur nom car ils ont bien souvent des températures pouvant atteindre 600 voire 1000K, soit entre 5 et 10 fois la température moyenne de surface. Si l'on s'en tient alors à la loi de Planck donnant la loi en flux d'un corps noir en fonction de la température et de la longueur d'onde, on s'aperçoit que les points chauds rayonnent de préférence dans une gamme du spectre lumineux comprise entre 3 et 10μm. Or cette région spectrale est également celle où le spectre de la lumière solaire réfléchie décroit fortement et où l'émission en provenance du chauffage thermique de la surface par la lumière du Soleil est encore négligeable. C'est pourquoi la bande d'observation privilégiée correspond au proche infrarouge (bandes L: 3.5μm, L': 3.8μm et M: 4.8μm).

3. Phénomènes des satellites galiléens de Jupiter

On ne présente plus les phénomènes des satellites galiléens, surtout au Bureau des longitudes. Cependant, on peut dire que parmi les phénomènes dits classiques, seuls présentent un intérêt les éclipses et occultations de Io par Jupiter. Ces phénomènes présentent l'immense avantage d'être très fréquents (ils surviennent à chaque orbite de Io, c'est-à-dire approximativement tout les deux jours). D'autre part, dans le cas des éclipses, Io se retrouvant alors dans le cône d'ombre de Jupiter, il n'existe alors, dans la lumière qu'il nous envoie, aucune composante due à la réflexion de la lumière solaire par la surface. Ceci donne une très grande sensibilité à la détection infrarouge des points chauds qui constituent de ce fait les seules sources lumineuses visibles sur Io.

Cependant, le monde étant très imparfait, les inconvénients inhérents à l'observation de tels phénomènes apportent des limitations importantes à leur intérêt. En effet, ces évènements astronomiques ne concernent, par essence même, que le même secteur de l'orbite de Io, celui situé à plus ou moins 20 degrés de part et d'autre du méridien origine et qui baigne en permanence dans l'ombre de Jupiter. Ceci restreint donc l'étude du volcanisme de Io à l'hémisphère faisant face à Jupiter. D'autre part, dans le cas de l'observation des occultations de Io par la planète, la présence d'une atmosphère autour de celle-ci introduit des perturbations, essentiellement dues à la réfraction, sur le rayonnement en provenance des points chauds impliquant un affaiblissement en intensité de celle-ci et par là-même rendant plus difficile non seulement la détection des centres volcaniques mais aussi l'estimation de leur flux.

3.1. *Observation de Io en éclipse par Jupiter*

La figure 1 est une image infrarouge (3.8μm) de Io en éclipse par Jupiter prise à l'IRTF (D=3.2m). La résolution après traitement spécifique (Dumas, 1993) est d'environ 0.35 seconde de degré (résolution théorique en $\lambda/D \approx 0.25$). Io (en bas) brille du fait de l'émission thermique en provenance d'au moins trois centres volcaniques. Le centre le plus brillant est celui de Loki (à droite), à gauche se trouve le plus faible, probablement Kanehekili, tout en bas est visible un point chaud non encore répertorié. Europe (en haut) se trouve dans la lumière solaire mais semble extrêmement sombre du fait qu'à cette longueur d'onde, la lumière solaire se trouve absorbée par la glace d'eau, surtout au-delà de 3μm. C'est pourquoi, il apparait beaucoup plus bleu (sur le cliché en couleur) que Io et beaucoup moins brillant.

Fig. 1. Image de Io éclipsé et d'Europe hors éclipse prise le 24 avril 1996 à 16h25 TUC à 3.8μm (IRTF - diamètre de 3.2 m par J.Stansberry, Ch.Dumas et J.Spencer).

3.2. Observation photométrique d'occultations de Io par Jupiter

La figure 2 est une sélection de courbes de lumières, faites à 3.8μm, de sortie d'occultation de Io, qui se trouve alors dans l'ombre de la planète, par Jupiter (Spencer et al., 1994). Ces courbes montrent de manière très nette l'occultation de Loki et de plusieurs autres centres volcaniques. La phase d'occultation décrit la fraction du diamètre de Io qui a été occultée par le limbe de Jupiter. Dans cette configuration, se produisant à une longitude sub-terrestre de Io de 10 degrés, le flux capté en provenance de Loki est sévèrement réduit par rapport à sa valeur intrinsèque du fait de l'angle existant entre la direction de l'observateur et la normale à la surface en Loki. On constate que Loki, au mois de février 1991, a présenté un fort pic d'activité.

Le principal défaut de la méthode est que la seule observation d'une occultation d'un point chaud ne donne une information sur sa position à la surface de Io que pour une seule dimension avec une précision médiocre de l'ordre de 50-100 km. En fait, il est nécessaire d'utiliser la photométrie d'occultation en complément de l'imagerie en éclipse si l'on veut avoir accès à la fois au flux émis et à la localisation spatiale. C'est ainsi que l'équipe de John Spencer du Lowell Observatory mène depuis 1990 un suivi en continu de l'activité volcanique de Io. En particulier, les dernières observations (19 mars 1997) faites à la veille du démarrage de la série d'occultations mutuelles de Io et des autres satellites galiléens ont montré que Loki était revenu au niveau d'activité qu'il avait en 1991 en ayant un flux de l'ordre de 10 à 15% du flux total de Io en bande L' (3.8μm), avec une magnitude (à l'opposition ramenée à une distance de 4.2 UA) en éclipse de 6.37 à 3.5μm et de 4.22 à 4.8μm.

4. Phénomènes mutuels des satellites galiléens

Les phénomènes mutuels présentent le très gros avantage de mettre en jeu des corps qui n'ont pas d'atmosphère et donc permettent de s'affranchir des problèmes qui y sont liés et que l'on a pu évoquer précédemment. Cependant, ils ont aussi le gros défaut d'être très rares (toujours notre histoire que le

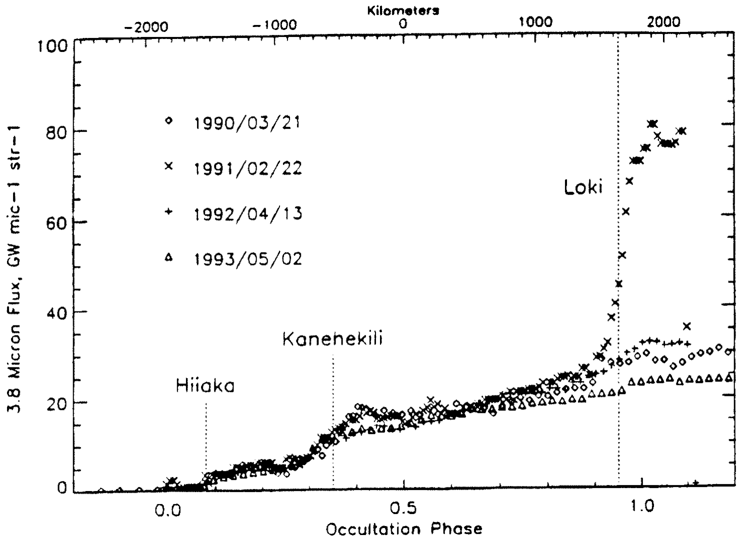


Fig. 2. Courbes de lumière de sortie d'occultations de Io par Jupiter à 3.8μm. Plusieurs points chauds sont nettement apparents (Spencer et al., 1994).

monde est décidément très imparfait, mais après tout cela vaut peut-être mieux ainsi ...) puisqu'ils ne surviennent que tous les six ans pendant une période d'à peu près six mois.

4.1. Principe de l'observation infrarouge d'une occultation de Io par un autre satellite galiléen

L'observation infrarouge d'une occultation de Io par un autre satellite galiléen consiste essentiellement dans l'enregistrement du flux global issu des deux satellites au fur et à mesure que le satellite occultant, progressant le long de sa trajectoire, masque une partie du flux lumineux en provenance de Io. On obtient de cette manière une courbe dite "de lumière". Dans l'infrarouge, où, rappelons-le, l'essentiel du flux de Io provient des points chauds, la disparition de l'un de ces points va donner lieu à une brusque atténuation du flux global qui réapparaitra symétriquement lors de la réapparition du point chaud. Evidemment, plus le point chaud est actif, plus son flux est élevé et plus la chute occasionnée au moment de sa disparition sera forte et prononcée. L'observation d'un tel phénomène est donc un moyen très puissant pour détecter un ou des centres volcaniques en ayant en plus la mesure de sa localisation spatiale, de son flux, de ses dimensions (au moins celle selon le sens du mouvement relatif). L'observation de phénomènes consécutifs mettant en jeu les mêmes satellites mais pour des configurations géométriques respectives différentes permet la construction d'une carte tomographique du centre volcanique détecté puisque le flux en provenance de la région volcanique est intercepté par le disque du satellite occultant sous des angles différents. De telles courbes de lumières ont déjà été présentées lors des précédentes journées scientifiques (Descamps, 1992, 1995).

4.2. La première observation infrarouge d'une occultation mutuelle de Io en 1997

Ce genre d'observation a été effectué pour la première fois par Jay Goguen en 1985 (Goguen et al., 1988). Depuis, les campagnes d'observation de ce type de phénomène se sont développées et ont donné lieu à de nombreux résultats en 1991 (Descamps et al., 1992; Spencer et al., 1994) et déjà pour cette année la première observation d'une occultation de Io dans l'infrarouge a eu lieu le 28 mars dernier. En fait, le phénomène du 28 mars a été observé par deux équipes américaines, l'une sur le télescope de 5 m du Mont Palomar à 8μm (Phil Nicholson, Jay Goguen et Tom Hayward), l'autre à l'observatoire Lowell à 3.4μm (Bob Howell et John Spencer). Les données ne nous sont pas encore parvenues mais Phil Nicholson indique que "the timing of the sharp drop we observed in the 8 microns flux somewhere around 12:58 thru 12:59 suggests it was due to the occultation of Loki", de même, John Spencer précise, en ce qui le concerne, que "no hot spots were evident in a quick look at the data, but S/N is poor". Cependant, le tracé de la figure 3 qui montre les profils synthétiques des courbes de lumière obtenues dans ces longueurs d'onde, révèle clairement la correspondance entre les instants prédits de disparition et de réapparition de Loki derrière le disque d'Europe et les instants rapportés par Nicholson pour le "sharp drop" observé. Peu de doutes subsistent donc quant-au fait que le centre volcanique détecté est bien Loki qui confirme ainsi une activité particulièrement prononcée et qui semble se prolonger pour le plus grand bonheur des observateurs de phénomènes mutuels.

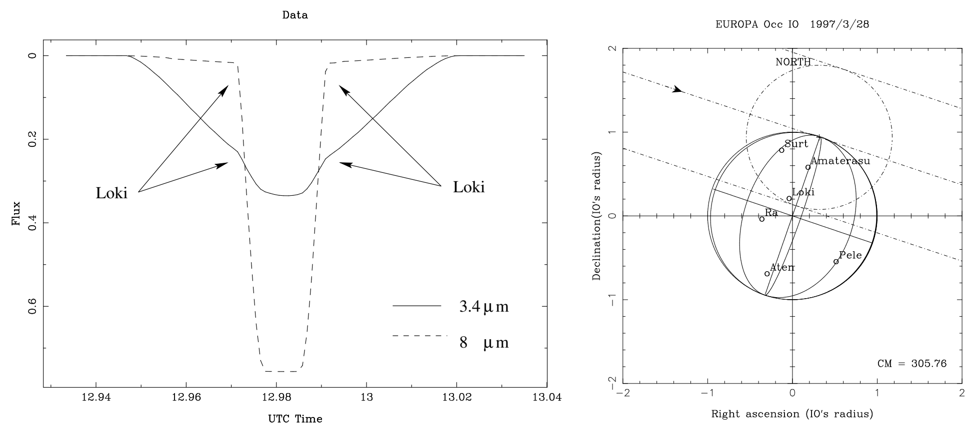
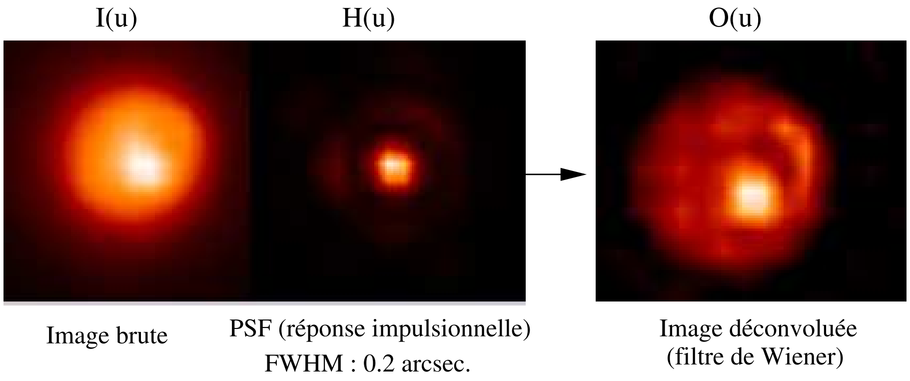


Fig. 3. Tracé des courbes de lumière synthétiques à 3.4μm et 8μm de l'occultation de Io par Europe le 28 mars 1997 ainsi que de la configuration géométrique correspondante.

Au Bureau des longitudes, nous ne comptons pas être en reste puisque du temps de télescope a été obtenu sur le télescope de 2.5m de l'ESO pour des observations à 3.8μm. De même, au Pic-du-Midi, avec la collaboration de François Sèvre de l'IAP, un photomètre infrarouge IRPHOT a été monté sur le télescope de 1m. Les premières observations devraient commencer vers le 31 mai 1997. En outre, le serveur WEB du Bureau des longitudes a été mis à contribution à l'occasion de la campagne PHEMU97 (`http://www.bdl.fr/phemu97.html`). Il propose notamment des services interactifs permettant le tracé des configurations géométriques des phénomènes ainsi que la possibilité pour les observateurs de télécharger leurs observations et d'en obtenir un tracé et un prétraitement en temps réel (`http://www.bdl.fr/cgi-bin/ CGI_pm/fileup.cgi`). D'autre part, l'ensemble des prédictions des occultations de Io ainsi que de ses principaux points chauds a été publié (Arlot et al., 1997).

5. Imagerie infrarouge de Io en optique adaptative

Signalons quand-même les résultats prometteurs obtenus en imagerie directe, en lumière solaire (c'est-à-dire hors éclipse et également hors phénomènes) avec la technique de l'optique adaptative qui permet de s'affranchir de l'effet perturbateur de l'atmosphère terrestre en reconstituant, en temps réel, le front d'onde hors atmosphère qui tombe sur le télescope. Les images présentées sur la figure 4 ont été réalisées par Franck Marchis, Renée Prangé et Olivier Forni de l'Institut d'Astrophysique Spatiale sur le télescope de 3.5 m de l'ESO à l'aide du système ADONIS (Adaptative Optic Near IR System) en bande L' (3.809μm) .Une mesure de la PSF (réponse impulsionnelle) permet, après déconvolution par filtre de Wiener (Marchis, 1996), d'obtenir une image de Io avec une résolution de 0.2 seconde d'arc. Cette image n'est pas encore complètement réduite car l'orientation du nord n'a pas encore été déterminée. Cependant la visualisation théorique de l'aspect de Io pour cette date montre clairement la présence au centre du disque de Io de Loki qui vraisemblablement peut être identifié comme étant le point brillant révélé par l'image infrarouge déconvoluée de Io. Cette technique devrait être utilisée en simultané, l'été prochain, lors de l'observation infrarouge d'occultations de Io à l'ESO sur le télescope de 2.5 m. Elle viendra donc compléter les données des courbes photométriques enregistrées.



$$I(u) = O(u).H(u) + N(u)$$

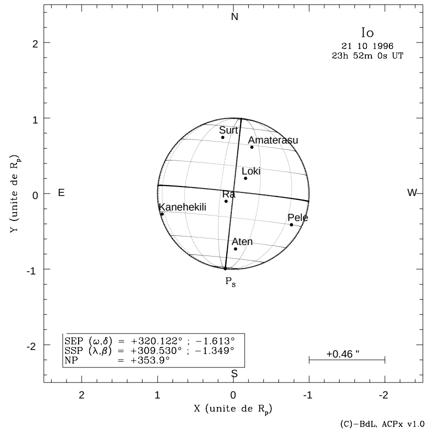


Fig. 4. Image de Io prise le 21 octobre 1996 à 23h52 UTC à 3.809μm sur le télescope de 3.5 m de l'ESO à l'aide du système ADONIS (F.Marchis, R. Prangé, O. Forni, IAS.)

6. Conclusion

L'étude du volcanisme de Io passe par l'observation de ses centres actifs. Les phénomènes des satellites galiléens de Jupiter constituent une opportunité qui n'est exploitée que depuis une dizaine d'années principalement parcequ'avant les années 70, la précision des théories et donc des éphémérides du mouvement de ces satellites n'autorisaient pas une prédiction suffisamment précise de ces phénomènes.

Cette année sera l'occasion d'observer, pour la troisième fois consécutive, ces phénomènes très particuliers et rares que constituent l'occultation de Io par un autre satellite galiléen. L'observation infrarouge de ces phénomènes devraient donner une moisson de résultats relatifs à l'état actuel du volcanisme de Io et venir ainsi compléter les observations réalisées par la sonde Galileo.

Toutefois, le développement de techniques travaillant à la limite de la résolution théorique des télescopes sera utile pour la surveillance de Io en complément des observations plus classiques des éclipses et occultations du satellite par Jupiter avec cependant un intérêt sur celles-ci non négligeable, la non-limitation en positions orbitales possibles de Io.

Références

Arlot, J.-E., Descamps, P., Thuillot, W., 1997, Occultations of Io in 1997-1998: Predictions for the observation of the hot spots, *Icarus*, **125**, 465-470.

Descamps, P., Arlot, J.-E., Thuillot, W., 1992, Observation of the volcanoes of Io, Loki and Pele, made in 1991 at ESO during an occultation by Europa, *Icarus*, **100**, 235–244.

Descamps, P., 1992, Les effets de surface dans la réduction des observations de phénomènes mutuels des satellites des planètes, *Notes scientifiques et techniques du Bureau des longitudes* **S038**, 37-42, Journées scientifiques du BDL 1992.

Descamps, P., 1995, Astrométrie de haute précision, dynamique et planétologie, *Notes scientifiques et techniques du Bureau des longitudes* **S050**, 21-26, Journées scientifiques du BDL 1994.

Dumas, Ch., 1993, Activité volcanique de Io et imagerie infrarouge, stage de DEA Astrophysique et techniques spatiales, Université Paris VII-XI.

Goguen, J.D., Sinton, W.M., Matson, D.L., Howell, R.R., Dyck, H.M., Johnson, T.V., Brown, R.H., Veeder, G.J., Lane, A.L., Nelson, R.M., Mc Laren, R.A., 1988, Io hot spots: Infrared photometry od satellite occultations, *Icarus*, **76**, 465-484.

Lieske, J. H., 1987, Galilean satellite evolution: Observational evidence for secular change in the mean motion, *Astron. Astrophys.*, **176**, 146–158.

Marchis, F., 1996, Application de l'optique adaptative ADONIS à l'étude des petites structures du système jovien, stage de DEA de planétologie, Université Paul Sabatier,

Spencer, J.R., Clark, B.E., Woodney, L.M., Sinton, W.M., Toomey, D., 1994, Io hot spots in 1991: Results from Europa Occultation photometry and infrared imaging, *Icarus*, **107**, 195–208.

Vasundhara, R., Arlot, J.E., Descamps, P., 1996, New constants for Sampson-Lieske theory of the Galilean satellites of Jupiter from mutual occultation data, in *Dynamics, ephemerides and astrometry of the Solar system*, 145-150, UAI Symposium 172, S. Ferraz-Mello, B. Morando and J.-E. Arlot eds, Kluwer, Dordrecht.