



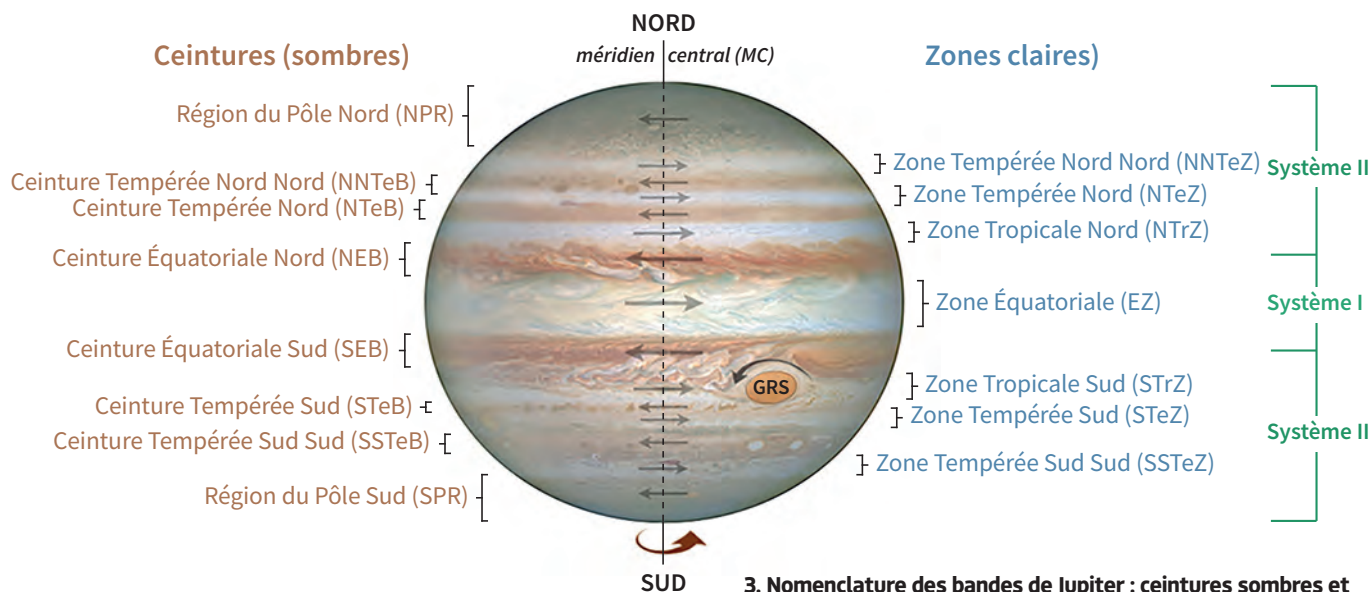
OBSERVATION EN HAUTE RÉOLUTION DE JUPITER ET DE SES SATELLITES

Des astronomes amateurs talentueux ont profité de la période de l'opposition favorable de Jupiter, d'un télescope de grand diamètre et d'un ciel d'altitude pour réaliser des images très détaillées de la planète et des satellites galiléens.

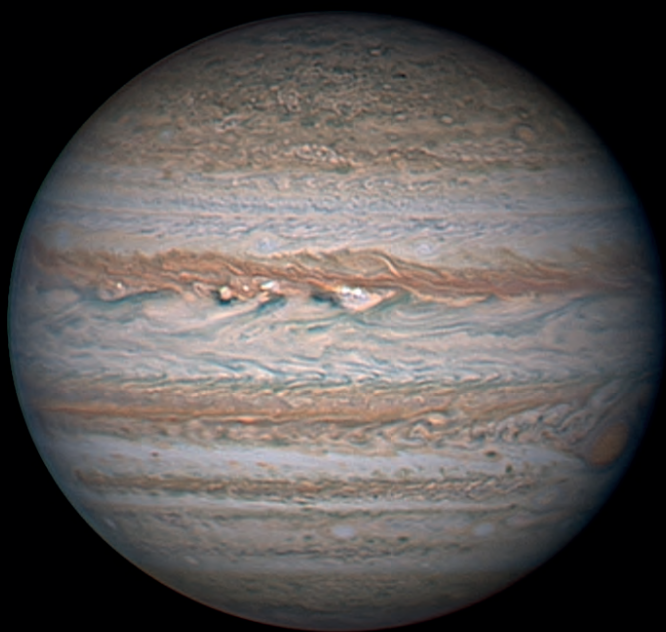
L'opposition de Jupiter du 26 septembre 2022 fut remarquable. La planète était à seulement 591 millions de kilomètres de la Terre, avec un diamètre équatorial apparent de 49,9". Nous avons profité de cette période favorable pour imager Ganymède, le plus grand des satellites galiléens (voir *L'Astronomie* n° 168, février 2023). Lors de l'opposition de l'automne 2023, Jupiter était au plus près de la Terre le 1^{er} novembre, à 596 millions de kilomètres, avec un diamètre apparent de 49,5".

Nous avons eu la chance d'utiliser un télescope Ritchey-Chrétien de 508 mm de l'observatoire de Saint-Véran du 1^{er} au 7 octobre 2023, soit environ un mois avant l'opposition, où nous avons bénéficié d'une période de beau temps ininterrompue et de bonnes à très bonnes conditions de turbulence. Le diamètre apparent de Jupiter se situait alors entre 47,8" et 48,3".

Nous avons utilisé une focale de 8 200 mm (F/D 16) obtenue avec une Barlow 2× montée devant un correcteur de disper-



3. Nomenclature des bandes de Jupiter : ceintures sombres et zones claires. Les flèches indiquent le sens global de circulation des courants-jets par bande.
D'après T. Lombry (astrosurf.com/luxorion/sysol-jupiter.htm).



1. et 2. Images de Jupiter acquises au télescope de 508 mm par turbulence très faible.

À gauche, le 1^{er} octobre 2023 à 23 h 44 min 12 s, diamètre apparent : 47,8", MC I (longitude du méridien central système I) : 75,3° ; MC II : 105,3° ; MC III : 134,3°.

À droite, Jupiter le 7 octobre 2023 à 3 h 47 min 54 s, diamètre apparent : 48,3", MC I : 294,0° ; MC II : 284,6° ; MC III : 315,0°.



sion atmosphérique et une roue à filtres. Les acquisitions ont été effectuées avec une caméra Player One Mars-C II qui renferme un capteur CMOS de Sony IMX662 avec des pixels de 2,9 μm de côté. L'échantillonnage obtenu est de 0,072"/pixel, soit environ R/3, où R est la résolution du télescope dans le visible (0,24"). Malgré la matrice de Bayer du capteur couleur, ce montage permet d'atteindre la résolution théorique du télescope. Les films enregistrés, d'une durée de 3 min, regroupent en moyenne 25 000 images élémentaires. Le parti pris pour lutter contre la turbulence a été de réaliser des poses unitaires courtes de 4 à 6 ms avec un gain de la caméra de 400. Les films ont été traités avec Autostakert 3.14 avec une sélection de 30 % des meilleures images, puis avec Astrosurface où un traitement par ondelettes a été appliqué. Les images présentées dans cet article résultent de l'empilement de trois ou quatre vues successives réalisées avec Winjupos.

Jupiter en haute résolution

Les images de Jupiter, orientées avec le pôle Nord dirigé vers le haut, présentent une multitude de détails (figures 1 et 2). Le 1^{er} et le 7 octobre, la turbulence particulièrement faible a conduit à une résolution proche de la limite théorique du télescope. La qualité des images a été évaluée en mesurant le diamètre des plus petites taches non ambiguës visibles sur l'image. Ce critère peut fournir des valeurs meilleures (plus

faibles) que la résolution théorique du télescope, car il ne s'agit pas là de la résolution entre deux taches, mais de la visibilité d'un détail isolé.

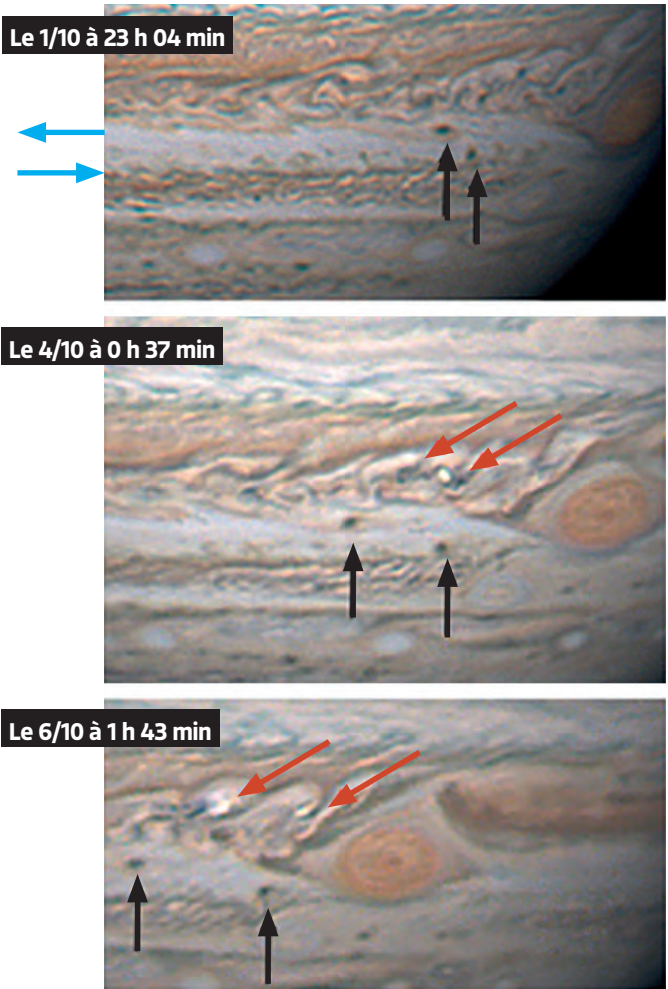
L'image du 1^{er} octobre (résolution estimée à 0,2") montre la Grande Tache rouge (GTR) au couchant suivie de l'« empilement » de figures obliques sigmoïdes (qui a la forme d'un S). Celles-ci sont liées à la perturbation de l'écoulement dans la *ceinture équatoriale sud* SEB induite par la GTR (voir la nomenclature figure 3, page ci-contre). L'empilement apparent de ces figures obliques sigmoïdes résulte des sens opposés des courants-jets, progrades (vers l'est) sur la bordure nord de la SEB et rétrogrades (vers l'ouest) sur sa bordure sud qui contournent par le nord la GTR, comme on le voit très bien sur le *time-lapse* enregistré par *Voyager 1* [1]. De magnifiques panaches bleutés partent du sud de la *ceinture équatoriale nord* NEB et s'étalent dans la *zone équatoriale EZ*. Au pied de ces panaches, les zones très sombres se rapportent sans doute aux points chauds découverts par *Galileo* et confirmés par la sonde *Juno* [2]. Ils sont décrits comme très brillants dans l'infrarouge (5 μm) à partir d'images du télescope North Gemini d'Hawaï [3]. On observe également dans cette région de petites taches blanches circulaires très lumineuses qui correspondent à la remontée de nuages plus profonds. On note la structure très détaillée de la *zone tropicale nord* NTrZ, remplie de festons bleutés. Cette structure très fine disparaît dès que la résolution est moins bonne. La partie nord de la planète



est beaucoup plus complexe que sa partie sud avec une multitude de taches blanches et grises. Les *bandes tempérées nord-nord* NNTeB et NNTeZ, indistinctes, sont noyées dans la zone polaire. Dans la partie basale de la grande *zone équatoriale* EZ, on reconnaît de très nombreux chevrons couchés, pointés vers l'est, de couleur gris bleuté [4], et de mouvement prograde (vers l'est). La *zone tempérée sud* STeZ, au sud de la Grande Tache rouge, est bordée de nombreux spots clairs et la *ceinture tempérée sud-sud* SSTeB, plus au sud, comporte plusieurs ovales blancs qui sont des structures anticycloniques.

L'image du 7 octobre, pratiquement aussi résolue que celle du 1^{er}, montre une NNTeB bien marquée avec des spots sombres et des ovales de petite dimension au sud de la NNTeZ également bien visibles. Le bord sud de la NEB est beaucoup moins perturbé que la région observée le 1^{er} octobre ; néanmoins, il présente encore de beaux panaches bleutés. La *ceinture tempérée sud* STeB est discontinue, réduite à une succession de spots et d'ovales sombres.

La très bonne résolution des images permet de suivre des évolutions au jour le jour sur la planète (figure 4).



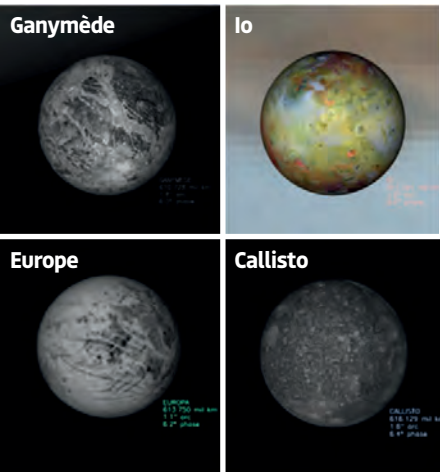
4. Évolution à court terme de taches et de spots autour de la Grande Tache rouge. En un peu plus de deux jours, du 1^{er} à 23 h 04 min au 4 à 0 h 37 min, on voit le déplacement rapide de deux taches noires (flèches noires), entraînées par des jet-streams (courants-jets) de sens opposés (flèches bleues), qui s'écartent très rapidement. Sur un intervalle de temps équivalent, du 4 à 0 h 37 min au 6 à 1 h 43 min, apparaît un spot blanc (flèches rouges) qui semble déjà se diluer deux jours plus tard sur l'image du 6 octobre.

Cap sur les satellites

Les images des satellites que nous avons obtenues sont comparées à des simulations provenant de Winjupos dont la résolution a été dégradée avec un filtre flou gaussien. Les quatre images en pleine résolution aux dates des observations (tableau 1) sont regroupées sur la figure 5.

Satellite	Diamètre en "	Date et heure observation (TU)	Méridien central MC	Image
Ganymède	1,78	6/10/2023 à 1 h 43 min	182°	A
Io	1,23	6/10/2023 à 2 h 27 min	170°	B
Europe	1,06	4/10/2023 à 23 h 35 min	5°	C
Callisto	1,61	4/10/2023 à 0 h 37 min	356°	D

Tableau 1. Données d'observation des satellites..



5 : Simulation de la surface des quatre satellites : Ganymède, Io, Europe, Callisto, aux heures d'observation du tableau 1. Simulateur JPL-NASA (<https://space.jpl.nasa.gov>).

IMAGE A

Elle montre une résolution estimée à 0,3", proche de celle du télescope.

Jupiter expose ses ceintures foncées et ses zones claires, avec leurs instabilités atmosphériques, dont les vortex cycloniques et anticycloniques, parmi lesquels la célèbre Grande Tache rouge.

Ganymède est en occultation partielle quasi rasante près du pôle Sud de la planète. C'est la plus grande lune du Système solaire, que nous avons déjà décrite dans *l'Astronomie* de février 2023 (n° 168). Quelques-unes de ses principales géomorphologies se dévoilent, dont l'immense zone sombre constituée des régions de *Galileo regio* et *Marius regio* séparées par une dépression coudée un peu plus claire, l'*Uruk sulcus*, l'ensemble formant une « triplète » de plus de 5 000 km de diamètre, caractéristique de la surface du satellite.

Elle s'oppose à la région à fort albédo d'*Osiris*, bien visible plus au sud, du nom du principal cratère d'impact récent de ce secteur.

IMAGE A

Jupiter et Ganymède le 6 octobre 2023 à 1 h 43 min 54 s. Résolution estimée à 0,3". Diamètre apparent : 48,2", MC I : 60,3° ; MC II : 59,2° ; MC III : 89,4°.

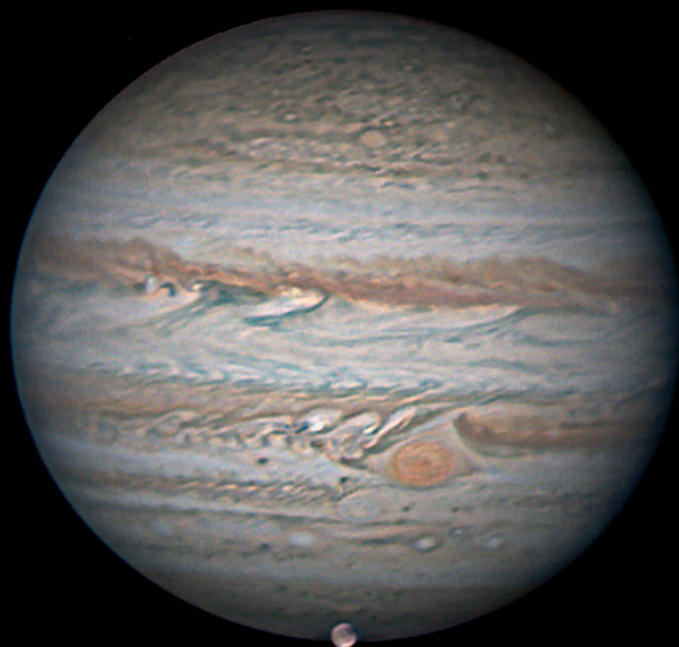


IMAGE B

Enregistrée 44 minutes après l'image A, l'image B permet de retrouver cette géomorphologie en dépit d'une qualité moindre liée à une légère dégradation de la qualité du ciel.

En plus de Ganymède, qui a terminé son passage devant la planète, il faut noter la présence de **Io**, le satellite le plus proche de Jupiter, dont l'ombre glisse sur la planète. On peut souligner ici le contraste d'albédo entre les deux satellites, élevé pour Io (63 %) et modéré pour Ganymède (44 %).

Sur Io, on distingue une zonation latitudinale, avec trois ensembles de plaines à albédos très différents, que nous avons vérifiée *a posteriori* sur la carte USGS du satellite de 2012 basée sur les données des sondes *Voyager* et *Galileo* [5, 6]. Ces plaines occupent environ les deux tiers de la surface de Io.

Au nord et au sud du satellite, par des latitudes supérieures à 30°, les plaines sont de couleur brun-rouge, teintées par une forte altération induite par des radiations. Elles contrastent et encadrent les plaines équatoriales blanchâtres colorées par la présence de dioxyde de soufre (SO₂) qui se développent sur la face anti-jovienne de Io (rotation synchrone), par des longitudes entre 90 et 230° W, là où des températures plus basses permettent sa préservation [7]. Le méridien central (MC) de notre image de Io, à 170° W, est centré sur cette zone plus brillante que l'on peut ainsi identifier.

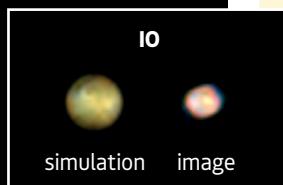


IMAGE B

Jupiter, Io, son ombre, et Ganymède le 6 octobre 2023 à 2 h 27 min 54 s. Résolution estimée à 0,35". Diamètre apparent : 48,2", MC I : 87,2° ; MC II : 85,8° ; MC III : 116,0°.





IMAGE C

Jupiter et Europe émergeant de derrière la planète le 4 octobre 2023. Résolution estimée à 0,25". Diamètre apparent : 48,1", MC I : 184,1° ; MC II : 191,3° ; MC III : 221,1°.

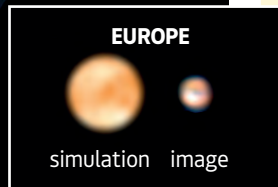
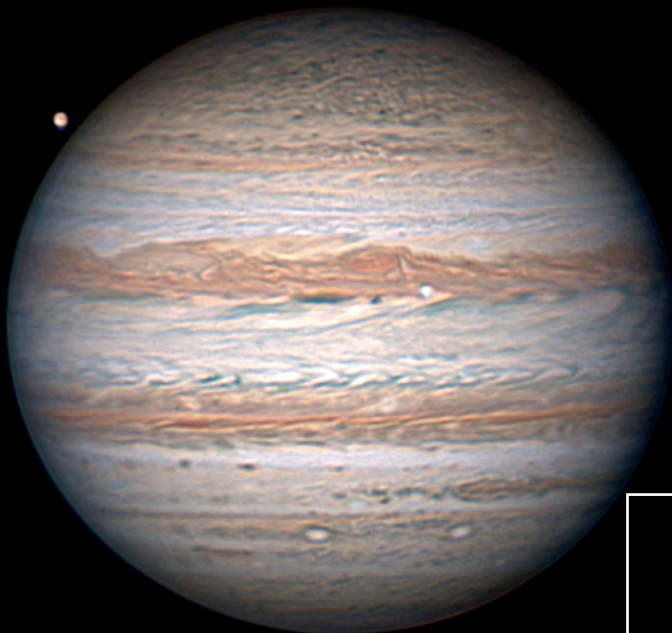


IMAGE C

Elle présente le satellite **Europe** qui, malgré sa petite taille et sa caractéristique de lune entièrement glacée, montre deux ensembles distincts :

- une large plage blanche dans sa partie sud et ouest correspondant, en se référant à la carte [8] et à la simulation de la Nasa [9], à une formation de plaine glacée peu fissurée ;

- une autre zone, située au centre-est du satellite, avec des couleurs plus sombres, de brun à brun rougeâtre, se rapportant par ailleurs à une région intensément fissurée, colorée par des remontées de différentes solutions salines, le long de fissures, qui débordent largement sur leurs épaulements.

La croûte de glace de cette lune abrite un océan d'eau salée en contact avec les roches du manteau. Ce type d'environnement est considéré comme favorable à l'apparition de la vie. La découverte très récente de dioxyde de carbone d'origine interne à la surface du satellite par le télescope spatial *James-Webb* a renforcé l'intérêt pour cette hypothèse, d'autant plus que ce CO₂ est surtout présent dans les zones topographiques chaotiques où la surface fracturée d'Europe est rajeunie par des remontées récentes d'eau de l'océan souterrain [10, 11].

CALLISTO

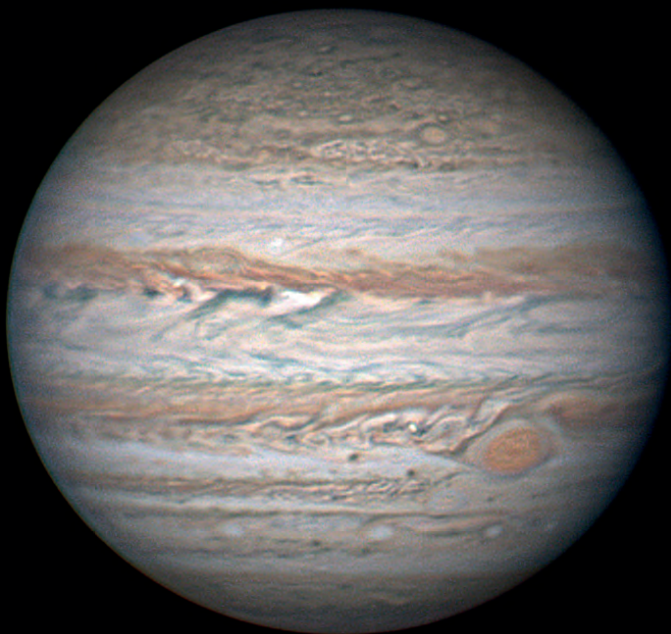


IMAGE D

Jupiter et Callisto le 4 octobre 2023 à 0 h 37 min 36 s. Résolution estimée à 0,3". Diamètre apparent : 48,0", MC I : 63,9° ; MC II : 78,3° ; MC III : 107,9°.

IMAGE D

Cette image expose **Callisto**, la plus lointaine des lunes galiléennes. La surface du satellite est mal connue, car assez peu imagée par les sondes spatiales, comme le montrent les cartes géologiques disponibles [12]. Sa surface très sombre est à la fois très anciennement cratérisée et très peu rajeunie, ne subissant pas, à la différence des trois autres satellites, d'effets de marée intenses qui induisent un réchauffement et une fusion partielle de leur manteau et de leur noyau pouvant générer des événements tectoniques et une activité volcanique.

L'albédo de ces plaines très cratérisées, qui couvrent la majeure partie de la surface du satellite, est faible, de l'ordre de 20 % [13].

Cependant, quelques cratères d'impact plus récents, pouvant atteindre une taille significative, présentent des albédos élevés. C'est surtout le cas de la quinzaine de cratères les plus jeunes (classe 3, selon la nomenclature de la carte géologique). Ces cratères d'impact ont des diamètres compris entre 100 et 250 km et sont caractérisés par un cratère interne et une couronne radiale d'éjectats qualifiés de brillants [14].

Enfin, deux énormes cratères d'impact multi-annulaires, Valhalla et Asgard (diamètres respectifs de 1900 et 1500 km), plus anciens, présentent des albédos intermédiaires [15, 16].

C'est l'ensemble de ces cratères d'âges plus récents qui pourrait correspondre aux plages plus claires observées sur les marges ouest et sud de l'image que nous avons enregistrée.

À l'instar d'Europe et Ganymède, l'interprétation des données acquises par la sonde *Galileo* dans les années 1990 a mis en avant la présence possible d'un océan souterrain. De nombreuses études postérieures ont débattu de la profondeur de cet océan, voire de son existence. Callisto est une cible additionnelle des programmes des missions spatiales européenne *JUICE* [17] et américaine *Europa Clipper* qui doivent survoler le système jovien au début des années 2030 [18].

Conclusions

Les résultats sur la résolution et l'identification de géomorphologies à la surface de Ganymède, obtenus en 2022 et publiés en 2023 [19], ont été étendus en 2023 aux trois autres satellites galiléens en dépit de leurs tailles plus petites et des contrastes plutôt moindres de leurs surfaces [20].

Malgré une obstruction centrale très importante (40 %) qui dégrade en particulier le contraste des images, la combinaison d'une très bonne optique et d'une turbulence très faible a permis de réaliser des images avec un pouvoir séparateur proche de celui du télescope de 508 mm.

La question de la résolution de la surface des satellites galiléens avec des télescopes de moindre diamètre, plus proche des dimensions moyennes utilisées par les astronomes amateurs, est légitime. Bien sûr, des conditions de *seeing* correctes sont indispensables.

Des images obtenues avec un télescope de 300 mm de type Wright [21], utilisant la même technique d'acquisition (capteur CMOS), réalisées en périphérie urbaine à une altitude modeste (400 m) ont permis à Jean Dijon de déceler des variations à la surface de satellites joviens, en particulier sur Ganymède, le plus facile à résoudre. De tels détails paraissent donc accessibles, dans un très bon site, à un télescope de 250 mm de diamètre. Nous encourageons les amateurs à identifier les détails obtenus sur leurs clichés, et pourquoi pas à réaliser les planisphères de ces satellites. ■

Nous remercions l'association AstroQueyras pour l'utilisation d'un T508 Ritchey-Chrétien. Merci également à B. Dauchet pour l'organisation de la mission CAA S40 2023 ainsi qu'aux participants pour avoir rendu ces observations possibles et à S. Brouillard pour son apport technique.

Sauf indication contraire, toutes les images sont de Jean Dijon et de Bernard Balusseau.

Notes

1. https://en.wikipedia.org/wiki/File:790106-0203_Voyager_58M_to_31M_reduced.gif
2. <https://www.nasa.gov/image-article/hot-spot-jupiter/>
3. *Ibid.*
4. <https://science.nasa.gov/resource/jupiters-jet-stream-by-hubble/>
5. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/Io_geological_map_sim3168_sheet.pdf
6. <https://www.usgs.gov/media/videos/rotating-globe-io-geology>
7. D. A. Williams, L. P. Keszthelyi, D. A. Crown, P. E. Geissler, P. M. Schenk, Jessica Yff, W. L. Jaeger, « Volcanism on Io: Results from global geologic mapping », *Abstracts of the Annual Meeting of Planetary Geologic Mappers*, Flagstaff, 2010, ntrs.nasa.gov.
8. <https://www2.jpl.nasa.gov/galileo/europa/clickmap/highres.html>
9. <https://space.jpl.nasa.gov/>
10. <https://nasa.gov/solar-system/nasas-webb-finds-carbon-source-on-surface-of-jupiters-moon-europa/>
11. Europe est donc l'objectif principal de la sonde *Europa Clipper* de la Nasa, dont le décollage est prévu en octobre 2024. Ganymède et Callisto, qui peuvent aussi héberger des océans souterrains, ne sont que des objectifs secondaires de la mission.
12. <https://pubs.usgs.gov/imap/2581/plate-1.pdf>
13. *Ibid.*
14. *Ibid.*
15. *Ibid.*
16. <https://pubs.usgs.gov/imap/2770/pdf/i2770.pdf>
17. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Juice
18. <https://science.nasa.gov/jupiter/moons/callisto/facts/>
19. B. Balusseau et J. Dijon, « Observation et identification de formations à la surface de Ganymède », *L'Astronomie* n° 168, février 2023, p. 50-55.
20. À noter que nos images ont été réalisées entre les phases de pleine Lune et de dernier quartier, ce qui, bien sûr, n'affecte pas la résolution.
21. Jean Dijon, « Réalisation d'un télescope de Wright », *L'Astronomie* n° 166, décembre 2022, p. 51-57.