

## LES VOLCANS DE GLACES SUR LES SATELLITES D'URANUS.

D'après une analyse datant de 1988 du résultat de la mission Voyager.

### A - INTRODUCTION

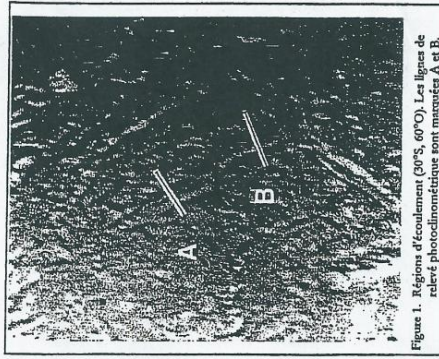
Un des résultats les plus intéressants de la mission Voyager vers Jupiter, Saturne et Uranus a été de constater combien même leurs petits satellites de glace ont subi un profond bouleversement de leur surface. Cependant, il n'est pas certain que ce « remodelage de la surface » a eu lieu à l'état liquide ou bien solide. Dans le système Jovien, des calculs de flottabilité semblent favoriser l'hypothèse d'une extrusion de glace chauffée et mobile plutôt que d'eau liquide. Néanmoins, il n'a été observé aucun signe géologique qui puisse indiquer qu'une extrusion de matière solide a eu lieu. Sur les satellites de Saturne, plus petits, les *atari de mobilité* suggèrent une extrusion de phase liquide. Leur morphologie est en accord avec cette interprétation. En revanche, dans le système d'Uranus, les premières études de la morphologie des satellites indiquent qu'il y a eu extrusion de matière solide. Dans ce sujet, nous confirmons cette hypothèse en quantifiant la morphologie des écoulements de matière. Nous déduisons approximativement la valeur de la viscosité des écoulements lors de leur extrusion et nous considérons les implications de cette valeur sur la composition et l'histoire thermique des satellites d'Uranus.

### B - OBSERVATIONS

Les indications morphologiques d'un remodelage de la surface des satellites d'Uranus sont particulièrement flagrantes sur le satellite Ariel (Figures 1 et 2). La plus grande partie de la surface est striée par un réseau de canyons / vallées linéaires. Sur le sol de certaines de ces vallées, on trouve des dépôts dont la densité de surface est inférieure à celle du reste du satellite et dont les *profils topographiques* apparaissent étonnamment lisses et convexes. Ces profils ont tendance à se redresser significativement en bordure des dépôts, pour former un front d'écoulement, semblable aux fronts d'avancée des glaciers sur terre. Certains de ces écoulements comportent des rainures centrales parallèles aux frontières des écoulements. La topographie convexe et la concentration géographique des dépôts dans les vallées suggèrent que ces dépôts soient constitués de matériau extrudé à l'état solide de l'intérieur vers la surface, probablement au cours d'une période d'extension du satellite.

Dans certains cas, les écoulements paraissent avoir été confinés par les parois des vallées. Pour d'autres exemples, en revanche, cela n'a pas été le cas. La figure 1 montre ainsi l'endroit où l'étendue latérale d'un écoulement reste relativement constante le long de l'axe du canyon (coupe A) tandis que la largeur même de ce canyon triple sur sa longueur (fin d'écoulement coupe B par rapport au début de l'écoulement au dessus de la coupe A). La figure 2 montre par ailleurs qu'un écoulement s'est élargi sur une plaine et a partiellement comblé un cratère d'impact de météorite.

Il est probable que les sources de la plupart des écoulements sont des systèmes de fractures linéaires apparus dans le sol des vallées. Cette interprétation est confortée (i) par la potentialité que de telles fractures suivent en parallèle les murs des vallées, (ii) par les bordures apparemment raides des écoulements et par l'étalement latéral limité de certains écoulements, indiquant qu'ils se sont élargis latéralement sur une courte distance plutôt que de couler sur de longues distances parallèlement aux parois des vallées. Dans les



### ÉPREUVE COMMUNE DE TIPE

TITRE: Les volcans de glaces sur les satellites d'Uranus.

Temps de préparation : 2 h 15

Temps de présentation devant le jury : 10 minutes

Entretien avec le jury : 10 minutes

#### GUIDE POUR LE CANDIDAT :

Le dossier ci-joint comporte :

Document principal : un article de 6 pages

Documents complémentaires : 2 pages

Divers : 1 page (glossaire)

Travail suggéré au candidat :

Vous ferez la synthèse des documents présentés, en mettant en avant les hypothèses qui ont été énoncées. Vous discuterez de leur importance et de l'impact sur les résultats obtenus par les auteurs.

Les mots en italique dans le texte sont expliqués dans le glossaire joint à la fin des documents principal et complémentaires

#### CONSEILS GÉNÉRAUX POUR LA PRÉPARATION DE L'ÉPREUVE :

- Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable
- Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury.

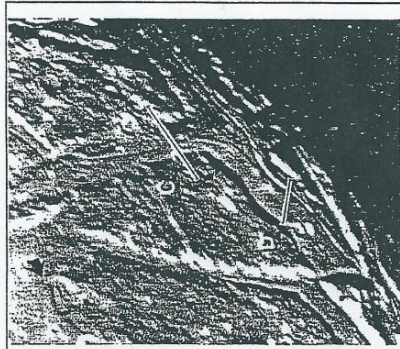


Figure 2. Régions d'écoulement à l'intérieur du gouffre de Keopie et Brownie. Les lignes de relevé photométrique sont marquées C et D. La flèche indique un écoulement recouvert partiellement un cratère.

larges vallées terrestres, le volcanisme est généralement concentré le long d'axes près de l'axe de la vallée. Cela pourrait aussi être le cas pour le satellite Ariel. Quelques-unes des rainures médianes des écoulements (coupe D figure 2) pourraient être dues à la jonction de deux écoulements indépendants extrudés de fractures parallèles sur le sol des vallées, étalés latéralement puis adjoints, sans s'être complètement coalescés.

Des signes d'un remodelage de la surface à l'état solide ont aussi été observés sur Miranda (Figure 3). La surface de Miranda est constituée de deux types de matériaux : un terrain âgé, recouvert de cratères et un terrain plus jeune strié par un réseau complexe de crêtes et de fractures. Par endroits, là où le matériau jeune entre en contact avec le terrain âgé, on observe distinctement des profils convexes semblables à ceux en bordure des écoulements sur Ariel. En ce qui concerne Ariel, l'explication la plus probable rattachée à cette morphologie tient dans le fait que les profils convexes sont des fronts d'écoulements et que le matériau nouveau a été mis en place à l'état solide.

Les propriétés rhéologiques des écoulements peuvent être déduites de détails de leur topographie. Nous avons obtenu les profils topographiques perpendiculaires aux écoulements en utilisant la photolinéométrie. La photolinéométrie utilise les fonctions photométriques d'une surface et la cartographie lumineuse d'une image pour en déduire des indications de pentes et d'inclinaison à partir de variations de la luminosité de la surface. Cette technique a été utilisée avec succès dans plusieurs applications planétaires. Pour déterminer avec précision une fonction décrivant la topographie, un grand nombre de relevés d'intensité furent pris le long de lignes à latitude photométrique constante à partir de deux images d'Ariel prises par une caméra de Voyager 2. Les relevés d'intensités  $I$  mesurés ont été comparés avec les variations d'intensités prédites par la fonction photométrique  $I \approx I_0 \mu^k$ , où  $I_0$  est le cosinus de l'angle d'incidence et  $\mu$  le cosinus de l'angle d'émission) avec un coefficient  $k$  égal à 0,85. La valeur de ce coefficient a été obtenue en minimisant un critère sommant le carré des écarts entre les points calculés et les points expérimentaux.

Cette fonction a permis de générer plusieurs profils photométriques perpendiculaires aux écoulements. Quatre d'entre eux sont présentés sur la figure 4 et correspondent aux quatre coupes A, B, C et D des figures 1 et 2. La résolution linéaire le long des profils est comprise entre 1,0 et 1,5 km. Le profil A montre la topographie perpendiculaire à un écoulement qui s'étend jusqu'aux parois des vallées. Le profil B montre le même écoulement là où la vallée s'est élargie. Cet écoulement mesure environ 1,2 km de haut et 20 km de large et est caractérisé par un profil lisse et convexe et une crête plane. Le profil C montre la topographie perpendiculaire à un écoulement situé dans une

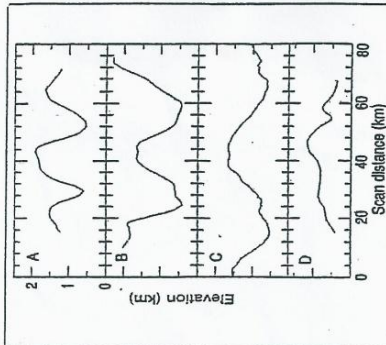


Figure 4. Profils topographiques le long des lignes de relevés des figures 1 et 2. L'expansion verticale est 10:1.

large vallée. Sa hauteur avoisine 1 km et sa largeur 40 km. Il présente lui aussi un profil lisse et convexe. Le profil D montre la topographie perpendiculaire à une région d'écoulement contenant une large rainure médiane. La région d'écoulement mesure 50 km de large au total et montre plusieurs crêtes s'élevant jusqu'à une hauteur de 0,8 km. Le profil convexe est toujours visible. La morphologie s'accorde bien avec l'hypothèse que la rainure centrale est le fruit de la coalescence partielle de deux écoulements.

C - METHODES

Il est possible d'évaluer la viscosité du matériau extrudé à partir de ces profils topographiques en employant un modèle simple. Nous faisons l'hypothèse d'un profil d'écoulement de fluide newtonien, incompressible, ayant une viscosité constante et s'étalant sur une surface plane sous l'effet de sa propre pression hydrostatique. Puisque la plupart des écoulements étudiés semblent être issus de fractures linéaires, nous utilisons un fluide bi-dimensionnel s'écoulant vers l'extérieur et possédant une symétrie par rapport à un plan  $\gamma z$ . Les axes  $x$  et  $y$  correspondent respectivement à la largeur et à la longueur de l'écoulement. Soit  $h(x, y)$  la hauteur du fluide à une distance  $x$  de la source au temps  $t$ . Alors, la pression du fluide à la hauteur  $z$  ( $z < h$ ) est égale à :

$$p = \rho g(h - z) \quad (1)$$

où  $\rho$  est la densité du fluide,  $g$  l'accélération due à la pesanteur pour le satellite Ariel. La pression exercée sur le haut du fluide est supposée égale à celle du vide, c'est à dire nulle.

La composante  $x$  de l'équation de mouvement d'un fluide newtonien en terme de vitesse est dérivée de l'équation de continuité qui n'est qu'une application de la loi de Newton reliant l'accélération à la somme des forces. Elle s'écrit :

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + 0 \quad (2)$$

accélération = force + force visqueuse gravitationnelle selon x

où  $u(x, z, t)$  est la vitesse horizontale dans le fluide et  $\eta$  est la viscosité du fluide. En introduisant l'équation (1) dans l'équation (2) et en négligeant les termes visqueux contenant des dérivées horizontales selon la largeur,  $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ , nous obtenons l'équation de mouvement du fluide newtonien s'appliquant à notre problème :

$$\rho g \frac{\partial h}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3)$$

1. Une rhéologie basée sur une loi puissance où la contrainte exercée sur le fluide est proportionnelle à la viscosité  $\eta$  et au gradient de vitesse élevé à la puissance  $n$  peut être mieux appropriée pour des conditions d'écoulement plus rapides mais le modèle newtonien suffit ici à obtenir une estimation de la mobilité relative des écoulements entre eux et par rapport à leur environnement.

Nous voulons obtenir une expression pour  $h(x,t)$  apparaissant dans l'équation (1) afin de tracer le profil perpendiculaire de l'écoulement et de le comparer aux relevés photométriques. Pour cela, il faut résoudre l'équation (3) en ajustant la valeur de la viscosité. L'expression finale de  $h(x,t)$  est compliquée et dépasse le cadre de ce sujet. Néanmoins, nous détaillons pour terminer cette partie quelques unes des étapes conduisant à la résolution de l'équation (3) en mettant en avant les aspects liés à la physique du phénomène observés et les variables qui en sont dérivées.

Les conditions aux limites sont :

- Pas de glissement à la base du fluide :  $u = 0$  à  $z = 0$
- Pas de frottement visqueux au sommet du fluide :  $\eta \frac{\partial w}{\partial z} = 0$  à  $z = h$

Après double intégration de l'équation (3) et exploitation des conditions aux limites pour déterminer les constantes d'intégration, nous obtenons l'expression suivante pour la viscosité horizontale  $\nu$  en fonction du gradient de  $h$  :

$$\nu(x, z, t) = -\frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial}{\partial z} (2h - z) \quad (4)$$

Une autre contrainte sur  $\nu$  et  $h$  est imposée par la conservation du volume au travers d'un plan vertical car il n'y a pas de disparition de fluide ou d'autre source de fluide que celle située à l'origine  $x = 0$ . Une autre formulation est : « Si la hauteur d'un volume donné décroît, sa largeur augmente, à longueur constante » :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_0^h u dz \right) = 0 \quad (5)$$

En instantant cette équation dans l'équation (3), nous obtenons l'équation aux dérivées partielles décrivant l'évolution de la hauteur  $h$  en fonction du temps :

$$\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 \quad (6)$$

Cette équation peut être résolue analytiquement pour des fluides dont le volume total de l'écoulement  $V$  varie avec le temps comme :

$$V = A t^\phi \quad (0 \leq \phi \leq 1) \quad (7)$$

où  $A$  est une constante et  $\phi$  un paramètre compris entre 0 et 1. Le cas  $\phi = 0$  correspond à un fluide dont le volume d'écoulement est constant au cours du temps. Le cas  $\phi = 1$  correspond à un écoulement constamment alimenté en matière à l'origine spatiale  $x = 0$ . Nous supposons par la suite que  $\phi = 1/2$ . Deux conditions aux limites s'appliquent à l'équation (6) permettant d'introduire deux variables ayant une consistance physique. Ce sont les conditions suivantes :

- Conservation du fluide à l'origine  $x = 0$  :  $Q(t) = \int_0^h u(x, t) dx = -\frac{1}{3} \frac{\partial h}{\partial x} \rho \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)_{x=0}$
- Conservation totale du fluide :  $V(t) = \int_0^x h(x, t) dx$

Où  $Q(t)$  représente la vitesse d'extrusion du fluide,  $V(t)$  est le volume total de l'écoulement et  $x_0$  définit la position du front d'avancement du fluide.

#### D - ANALYSE DES RESULTATS

Pour comparer le profil du fluide calculé au profil topographique mesuré, nous supposons que le fluide s'étale pendant un temps de refroidissement  $\tau_c$  défini par  $R/\kappa$ , où  $d$  est la hauteur présente de l'écoulement et  $\kappa$  la diffusivité thermique (supposée égale à celle de la glace H<sub>2</sub>O). Après une période de refroidissement, nous supposons que l'écoulement s'est refroidi suffisamment pour que sa viscosité se soit

accru substantiellement et que son étalage se soit arrêté. Cette hypothèse repose sur la croissance exponentielle de la valeur de la viscosité de la glace lorsque la température décroît. Remarquons que l'étalage des écoulements se refroidissant peut être gouverné par la viscosité des bords qui est plus grande car les bords sont plus froids. Le contenant peut être par exemple la paroi des vallées. Un refroidissement rapide du bord de l'écoulement peut alors stopper le mouvement avant même que l'intérieur de l'écoulement soit refroidi et rendu moins mobile. L'hypothèse énoncée est donc conservatrice puisqu'elle impose une valeur maximale de la viscosité de notre matériau extrudé.

Les profils ont été calculés en supposant une vitesse d'extrusion qui diminue au cours du temps telle que  $\phi = 1/2$  dans l'équation (7) et qui est nulle après  $t = \tau_c$ . On recherche le couple de variables (viscosité ; volume de l'écoulement) qui donne le meilleur ajustement entre les profils calculés et observés. Les résultats sont présentés sur la figure 5. Le profil 5D, haut et bas, correspond aux régions du profil D sur des côtés opposés de la rainure médiane. On observe sur la figure 5 un bon accord entre les profils calculés et mesurés, excepté au niveau des pentes fortes où les phénomènes de perte de masse peuvent entrer en jeu. Les valeurs limites de la viscosité sont toutes proches de 10<sup>16</sup> poises. Le profil 5A montre également les profils calculés pour des viscosités d'un ordre de grandeur en plus ou en moins que la valeur optimale de 4,5 10<sup>16</sup> poises. Les écarts constatés avec le profil mesuré démontrent que les valeurs de la viscosité trouvées sont cantonnées dans un intervalle d'incertitude restreint.

Par ailleurs, les valeurs des viscosités obtenues sont relativement insensibles à la forme de la fonction supposée pour décrire le volume total de l'écoulement et donc la vitesse d'extrusion. Prenant les deux extrêmes  $\phi = 0$  (tout le fluide est extrudé à l'instant initial) et  $\phi = 1$  (la vitesse d'extrusion est constante au cours du temps), nous avons trouvé des valeurs de viscosité qui encadrent les valeurs de la figure 5 et en diffèrent seulement par un facteur 2.

Une viscosité de la glace voisine de 10<sup>16</sup> poises représente une valeur extrêmement faible en comparaison avec ce que l'on trouve habituellement dans le système solaire et fournit des renseignements importants sur l'histoire thermique et sur la composition des satellites d'Uranus. En effet, si le matériau extrudé était de la glace H<sub>2</sub>O pure se comportant comme un fluide newtonien, les valeurs de viscosité calculées indiqueraient une température de la glace voisine de 240 K. Une telle température est 170 K supérieure à la température en surface évaluée pour ces satellites. L'hypothèse d'une glace constituée d'eau pure implique alors qu'un mécanisme a chauffé fortement l'intérieur des satellites à un moment donné dans le passé et que cette glace chauffée a été extrudée. Cette supposition pose cependant deux problèmes. Premièrement, il n'est pas certain que de telles sources de chaleur sont disponibles. La *chaîne d'accrétion* concentrée pendant un laps de temps bref au début de l'histoire du satellite. La chaleur d'accrétion de Miranda a un effet encore plus faible. Un chauffage plus récent due aux effets de *marée interne* causés par les interactions gravitationnelles avec les astres proches, notamment lors d'un rapprochement avec le satellite Umbriel, est incertain tant d'un point de vue de la probabilité que de la magnitude. Les mêmes conclusions sont valables pour Miranda. Le deuxième problème, plus sérieux, est posé par la difficulté à imaginer qu'un mécanisme de réchauffement global aussi puissant n'a pas conduit à une relaxation visqueuse substantielle des vastes cratères d'impact et des reliefs tectoniques voisins qui sont clairement antérieurs aux phénomènes d'extrusion (des cratères de 10 km se seraient anneblis en environ 100 ans sous l'effet de ces températures, élevées pour des objets dans le vide). Au lieu de cela, le matériau à faible viscosité semble avoir été séparé du reste de la surface puis mis en mouvement par des températures trop

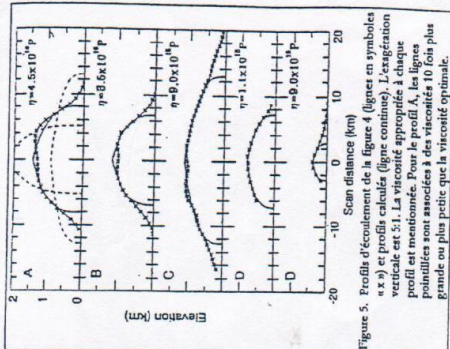


Figure 5. Profils d'écoulement de la figure 4 (lignes en symboles « x ») et profils calculés (ligne continue). L'extrusion verticale est 51. La viscosité appropriée à chaque profil est mentionnée. Pour les profils A, B, C, les viscosités sont associées à des viscosités 10 fois plus grande ou plus petite que la viscosité optimale.

185

190

195

200

205

210

215

220

225

230

235

240 basses pour permettre une relaxation des terrains avoisinants.

Il existe des arguments cosmologiques forts qui suggèrent que les satellites d'Uranus aient été formés dans des conditions conduisant à l'inclusion de composés volatils tels que CH<sub>4</sub>, CO, ou N<sub>2</sub> sous forme de *clathrate*, ou NH<sub>3</sub> sous forme de *dihydrate* d'ammonium stœchiométrique. Même de modestes quantités de chaleur d'accrétion auraient pu créer une zone superficielle dans laquelle une fusion partielle aurait produit du CH<sub>4</sub>, CO ou N<sub>2</sub> liquide, ou un alliage liquide *hydraté* H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub>. A cause de leur mobilité et de leur densité différente du matériau environnant, ces fluides auraient tendance à migrer pour former des zones distantes voire des *magmas*.

245 Stevenson et Lunine ont suggéré que l'inclusion dans la glace H<sub>2</sub>O de petites quantités de CH<sub>4</sub>, CO ou N<sub>2</sub> liquide puisse provoquer le fluage d'une matrice formée de grains fins de glace ayant une viscosité aussi basse que 10<sup>14</sup> poises. Ce mécanisme est séduisant mais n'a pas été vérifié et reste fortement dépendant de la taille des grains et des interfaces. Plus récemment, des résultats expérimentaux indiquent que la viscosité d'une glace H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub> peut être très inférieure à celle de la glace pure à la même température. Un solide de composition péritectique H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub> consiste en deux phases stables, la glace H<sub>2</sub>O et le dihydrate d'ammonium (NH<sub>3</sub>·2 H<sub>2</sub>O). La faible valeur de la viscosité observée expérimentalement pour ce mélange est caractéristique d'une rhéologie dominée par la mobilité d'une phase autre que H<sub>2</sub>O, probablement le dihydrate (bien que le monohydrate métabstable puisse aussi être présent). Même si des poches distinctes remplies d'une glace de composition péritectique s'étaient solidifiées après que la chaleur d'accrétion a été dissipée, elles pourraient redevenir plus mobiles à l'état solide par un réchauffement doux lors d'un épisode de marées gravitationnelles. D'autre part, une différenciation massive complète des satellites d'Uranus étant très improbable, le matériau entourant ces poches aura une densité comparable à la valeur moyenne du satellite, estimée à 1,6 g/cm<sup>3</sup>. Bien que le dihydrate d'ammonium soit légèrement plus dense que la glace d'eau pure, les poches pourraient flotter dans le matériau environnant indifférencié et remonter à la surface pourvu que leur mobilité soit suffisante. Des expériences sur ces glaces exotiques sont très souhaitables pour valider cette hypothèse.

250 E - CONCLUSIONS

265 Le remodelage de la surface à l'état solide qui a eu lieu sur les satellites d'Uranus est, à notre connaissance, unique dans le système solaire. Des écoulements de glace très localisés avec des viscosités de 10<sup>14</sup> poises sur des satellites aussi froids suggèrent la présence de matériaux capable d'augmenter substantiellement la mobilité. Si ce matériau est bien un condensat à basse température, alors, le volcanisme sous forme de glace solide pourra s'avérer également important dans la géologie des systèmes de Neptune et de Pluton.

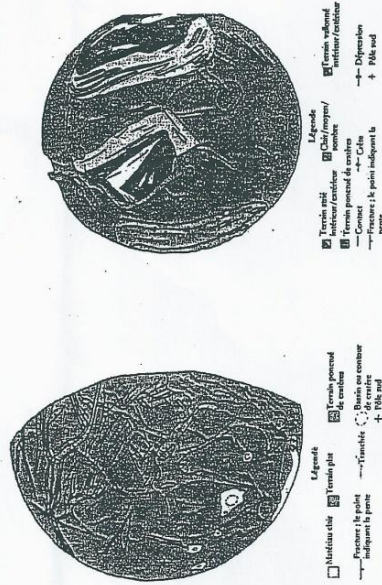
ANNEXES

D'après une analyse datant de 1986 des résultats de la mission Voyager dans le système solaire.

1. Données générales sur les cinq principaux satellites d'Uranus (données de 1986).

Nom	Diamètre (km)	Distance d'Uranus (10 <sup>3</sup> km)	Période orbitale (h)	Densité (g·cm <sup>-3</sup> )	Albédo
Miranda	484 ± 10	129,9	33,9	1,26 ± 0,39	0,34 ± 0,02
Ariel	1160 ± 10	190,9	60,5	1,65 ± 0,30	0,40 ± 0,02
Umbriel	1190 ± 20	266,0	99,5	1,44 ± 0,28	0,19 ± 0,01
Titania	1610 ± 10	436,3	208,9	1,59 ± 0,09	0,28 ± 0,02
Oberon	1550 ± 20	583,4	232,1	1,50 ± 0,10	0,24 ± 0,01

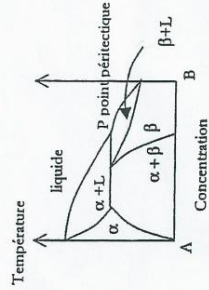
2. Schémas topographiques d'Ariel et de Miranda réalisées à partir des meilleures photographies prises par la sonde Voyager 2.



Ariel  
Miranda

## GLOSSAIRE

- Albédo :** Facteur de réflexion diffusive pour une longueur d'onde donnée.
- Cartographie lumineuse :** Technique consistant à partir d'une photo ou d'une image, à associer à chaque point de l'image une valeur numérique par rapport à une échelle donnée (ex. 0 pour blanc ; 1 à 99 pour les différents tons de gris ; 100 pour noir)
- Claïtrate :** solide cristallisé dans lequel certains atomes ou molécules sont piégés dans des cages tridimensionnelles formées par le constituant hôte.
- Calcul de mobilité :** Evaluation de l'aptitude d'un fluide à s'écouler. La mobilité est directement liée à la viscosité du fluide.
- Chaleur d'accrétion :** Chaleur dégagée lors de la formation des planètes et des satellites au cours de l'aggrégation des matériaux constituant les planètes et les satellites.
- Event :** Orifice dans le sol laissant échapper des gaz. Terme associé au volcanisme et plus particulièrement aux funiculles gazeuses s'échappant du sol.
- Extrusion :** 1. Action de forcer un objet à passer par un orifice plus petit. 2. Ejection sous pression de matière à travers un orifice.
- Hydrate :** forme particulière de clathrate où la cage est constituée de molécules d'eau.
- Martée interne :** Le rapprochement de deux corps célestes de taille importante crée un champ de gravité agissant sur chaque corps. Ainsi la lune provoque les marées des océans sur terre mais le champ de gravité généré agit également sur les couches intérieures du manteau terrestre et participe à leur mise en mouvement. Il en résulte un échauffement dû aux frottements.
- Pétitectique :** mélange P d'un système triphasique mettant en présence une phase liquide et deux phases solides  $\alpha$  et  $\beta$  de telle manière que lors de la solidification à la température petitectique  $\beta \rightleftharpoons \alpha + P$ .



- Photoclinométrie :** Technique de mesure du relief topographique basée sur la photographie.
- Profil d'écoulement :** Relevé métrique de l'étalement horizontal et du relief de l'écoulement
- Profil topologique :** Relevé métrique du relief, de l'altitude du terrain.
- Rhétologie :** Science de la déformation et des écoulements. Comprend notamment l'étude de la viscosité des fluides.

### 3. Comparaison de l'albédo des satellites planétaires (données de 1986).

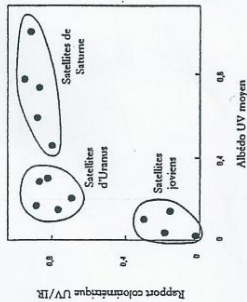


Figure A. Rapport colorimétrique UV/IR en fonction de l'albédo UV des satellites planétaires.

Les satellites de Jupiter sont caractérisés par un matériau fortement absorbant (très probablement un dérivé du soufre). Les satellites d'Uranus sont constitués de matériaux absorbant fortement dans les spectres IR et UV. Cette constatation invalide l'hypothèse de satellites formés de glace H<sub>2</sub>O pure. Un autre matériau de faible albédo doit aussi être présent. Les satellites de Saturne ont un albédo qui se rapproche de celui de la glace H<sub>2</sub>O pure.

### 4. Comparaison de la densité de quelques objets célestes (données de 1986).

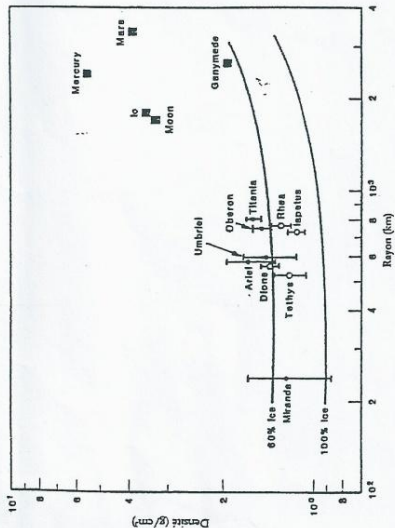


Figure B. Densité en fonction du rayon pour quelques satellites et autres objets célestes du système solaire. Les lignes solides représentent les modèles d'objets composés de glace H<sub>2</sub>O pure et d'un mélange glacé eau 60% - silicate 40%.

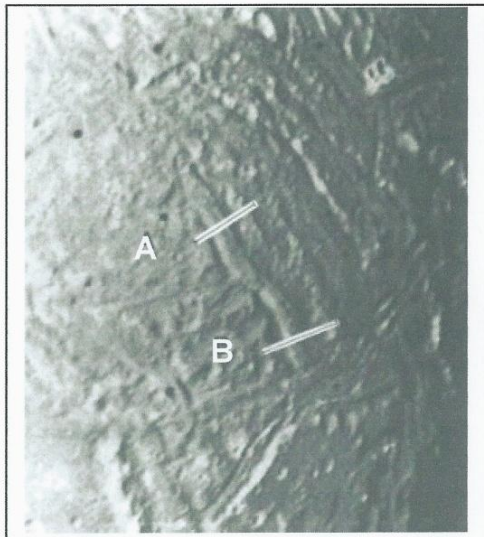


Figure 1. Régions d'écoulement (30°S, 60°O). Les lignes de relevé photoclinométrique sont marquées A et B.

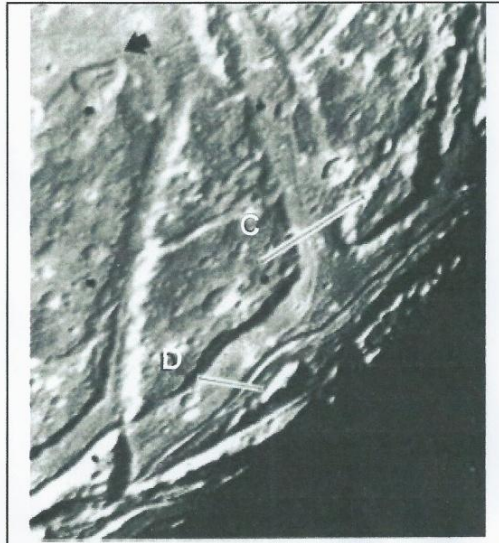


Figure 2. Régions d'écoulement à l'intérieur du gouffre de Kewpie et Brownie. Les lignes de relevé photoclinométrique sont marquées C et D. La flèche indique un écoulement recouvrant partiellement un cratère.

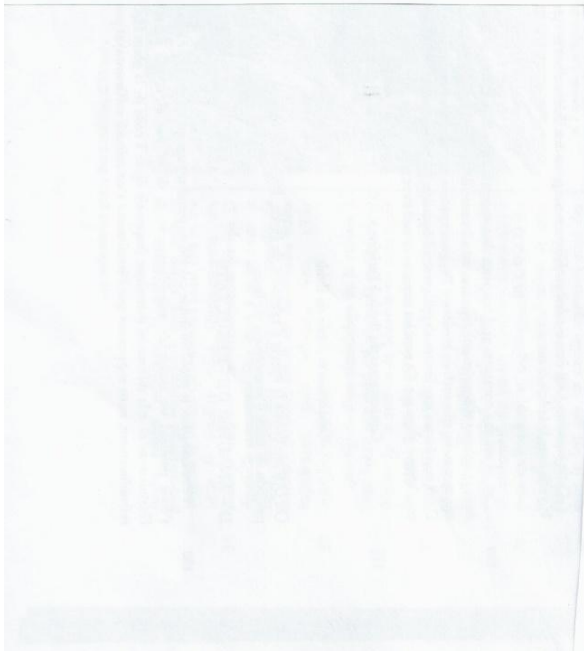


Figure 3. Frontière entre un terrain remodelé (en haut à gauche) et un terrain ancien, recouvert de cratères d'impact sur Miranda. Il montre la bordure convexe du terrain remodelé.

## ANNEXES

D'après une analyse datant de **1986** des résultats de la mission *Voyager* dans le système solaire.

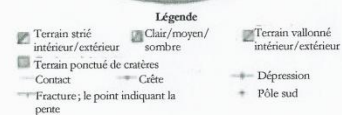
### 1. Données générales sur les cinq principaux satellites d'Uranus (données de 1986).

Nom	Diamètre (km)	Distance d'Uranus (10 <sup>3</sup> km)	Période orbitale (h)	Densité (g.cm <sup>3</sup> )	Albédo
Miranda	484 ± 10	129,9	33,9	1,26 ± 0,39	0,34 ± 0,02
<b>Ariel</b>	1160 ± 10	190,9	60,5	1,65 ± 0,30	0,40 ± 0,02
Umbriel	1190 ± 20	266,0	99,5	1,44 ± 0,28	0,19 ± 0,01
Titania	1610 ± 10	436,3	208,9	1,59 ± 0,09	0,28 ± 0,02
Oberon	1550 ± 20	583,4	232,1	1,50 ± 0,10	0,24 ± 0,01

### 2. Schémas topographiques d'Ariel et de Miranda réalisés à partir des meilleures photographies prises par la sonde *Voyager 2*.



**Ariel**



**Miranda**