

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

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.

LES VOLCANS DE GLACES SUR LES SATELLITES D'URANUS.

D'après une analyse datant de 1988 des résultats de la mission Voyager.

A – INTRODUCTION

5 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
10 glace chauffée et mobile plutôt que d'eau liquide. Néanmoins, il n'a été observé aucun signe géologique
15 *extrusion de matière solide* a eu lieu. Sur les satellites de Saturne, plus petits, les
calculs de mobilité suggèrent une extrusion de phase liquide. Leur morphologie est en accord avec cette
interprétation. En revanche, dans le système d'Uranus, les premiers
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
particulièrement flagrantes sur le satellite Ariel (Figures 1 et 2). La plus grande partie de la surface est striée
20 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 topologiques* 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
25 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

Dans certains cas, les écoulements paraissent
avoir été confinés par les parois des vallées. Pour
30 très 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
35 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 étalé sur une plaine et a partiellement comblé
un cratère d'impact de météorite.

40 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
45 des vallées, (ii) par les bordures apparemment
raides des écoulements et par l'étalement latéral
limité de certains écoulements, indiquant qu'ils se
sont étalés latéralement sur une courte distance
plutôt que de couler sur de longues distances
50 parallèlement aux parois des vallées. Dans les

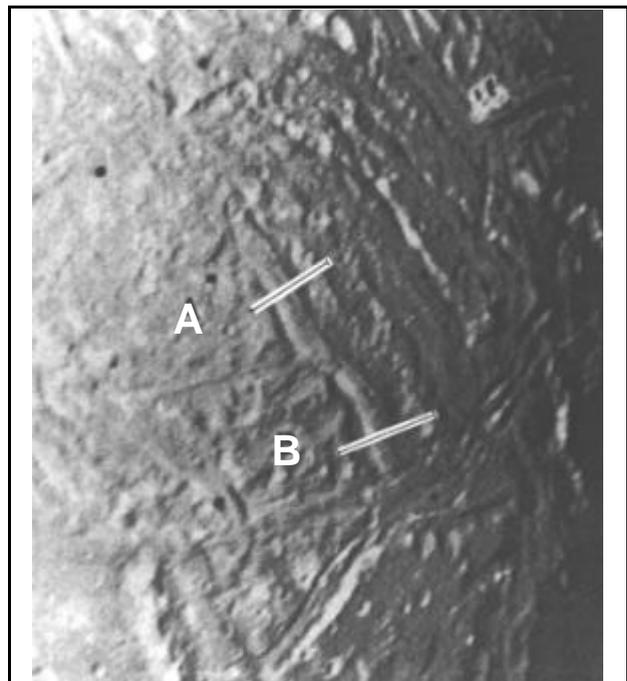


Figure 1. Régions d'écoulement (30°S, 60°O). Les lignes de relevé photoclinométrique sont marquées A et B.

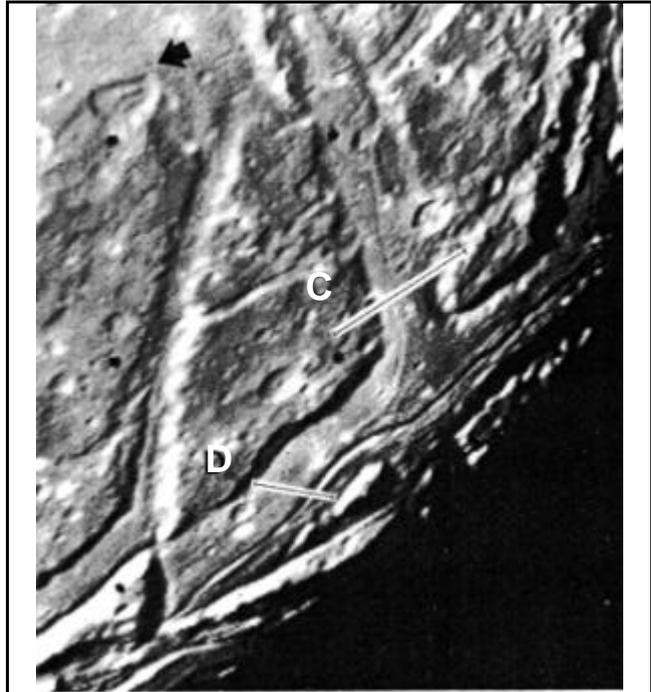


Figure 2. Régions d'écoulement à l'intérieur du gouffre de Kewpie et Brownie. Les lignes de relevé photométrique sont marquées C et D. La flèche indique un écoulement recouvrant partiellement un cratère.

90 mmant le carré des écarts entre les points calculés et les points expérimentaux.

95 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

100

105

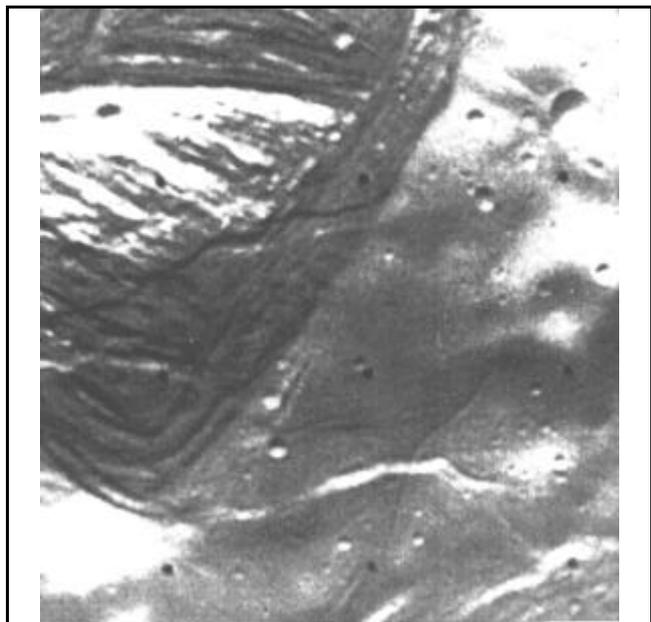


Figure 3. Frontière entre un terrain remodelé (en haut à gauche) et un terrain ancien, recouvert de cratères d'impact sur Miranda. Il montre la bordure convexe du terrain remodelé.

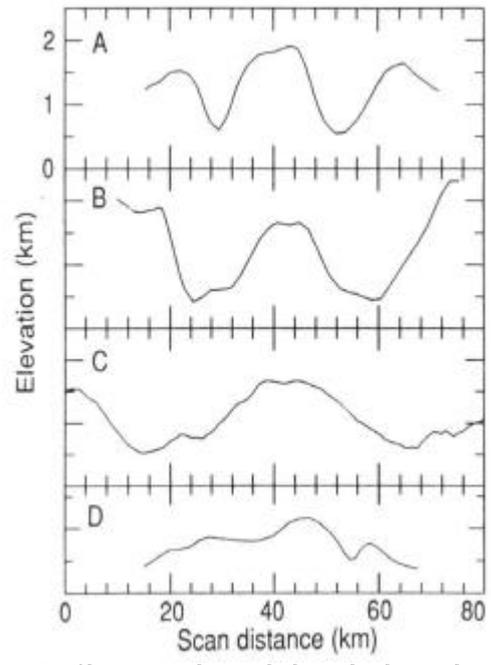


Figure 4. Profils topographiques le long des lignes de relevés des figures 1 et 2. L'exagération verticale est 10:1.

165 décrivant l'évolution de la hauteur h en fonction du temps :

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

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

$$V = At^f \quad (0 \leq f \leq 1) \quad (7)$$

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

175

- Conservation du fluide à l'origine $x = 0$ $Q(t) = \int_0^h h(0, z, t) dz = -\frac{1}{3} \frac{rg}{h} h^3 \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{x=0}$
- Conservation totale du fluide $V(t) = \int_0^{x_0} h(x, t) dx$

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

180 Pour comparer le profil du fluide calculé au profil topographique mesuré, nous supposons que le fluide s'étale pendant un temps de refroidissement t_s , défini par d^2/k , où d est la hauteur présente de l'écoulement et k la diffusivité thermique (supposée égale à celle de la glace H₂O). Après une période de refroidissement, nous supposons que l'écoulement s'est refroidi suffisamment pour que sa viscosité

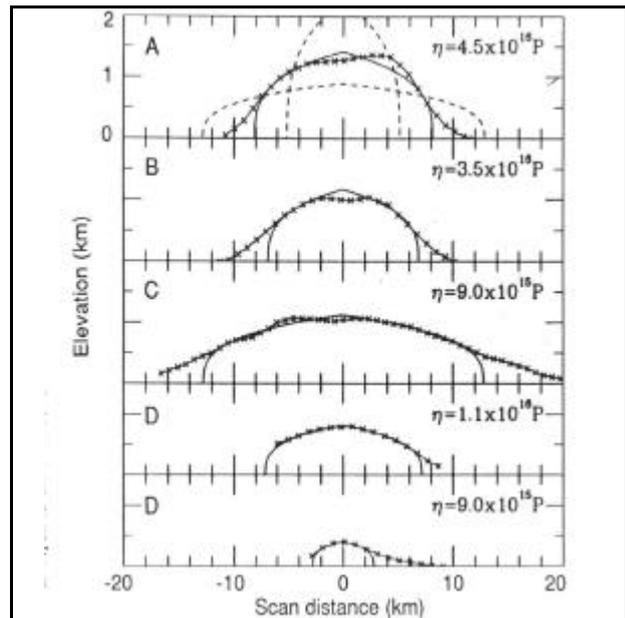


Figure 5. Profils d'écoulement de la figure 4 (lignes en symboles « x ») et profils calculés (ligne continue). L'exagération verticale est 5:1. La viscosité appropriée à chaque profil est mentionnée. Pour le profil A, les lignes pointillées sont associées à des viscosités 10 fois plus grande ou plus petite que la viscosité optimale.

230

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

235

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 ameublés 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

255 dihydrate (bien que le monohydrate métastable puisse aussi être présent). Même si des poches distinctes
remplies d'une glace de composition péritectique s'étaient solidifiées après que la chaleur d'accrét
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
260 iau entourant ces poches aura une densité comparable à la valeur
3. Bien que le dihydrate d'ammonium soit légèrement plus dense
que la glace d'eau pure, les poches pourraient flotter dans le matériau environnant indi
remonter à la surface pourvu que leur mobilité soit suffisante. Des expériences sur ces glaces exotiques
sont très souhaitables pour valider cette hypothèse.

E – CONCLUSIONS

265 Le remodelage de la surface à l'état solide qui a eu lieu sur les sa
connaissance, unique dans le système solaire. Des écoulements de glace très localisés avec des viscosités de
10¹⁶ 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
270 de Neptune et de Pluton.

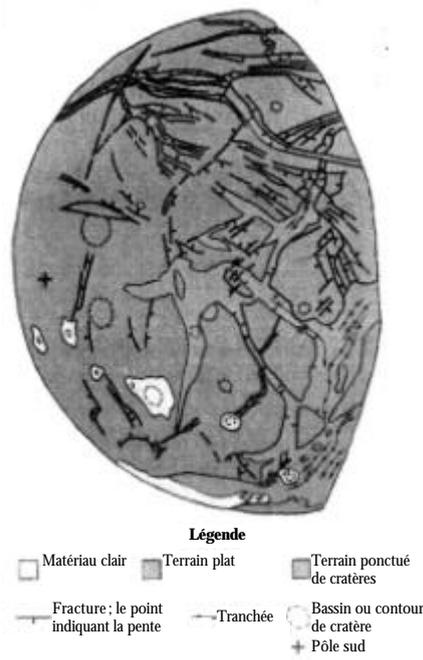
ANNEXES

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

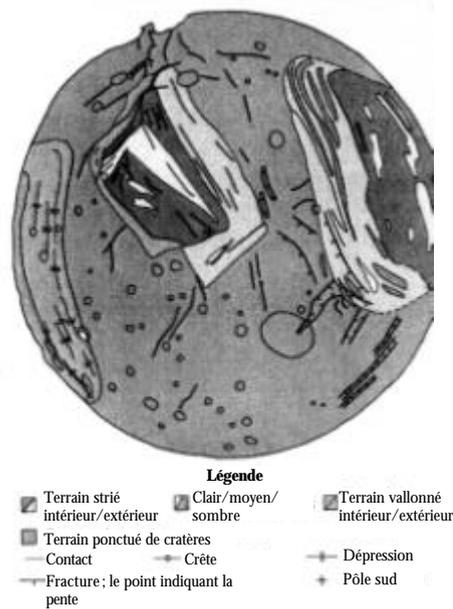
1. Données générales sur les cinq principaux satellites d'Uranus (données de 1986).

Nom	Diamètre (km)	Distance d'Uranus (10 ³ km)	Période orbitale (h)	Densité (g.cm ³)	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 réalisés à partir des meilleures photographies prises par la sonde *Voyager 2*.



Ariel



Miranda

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

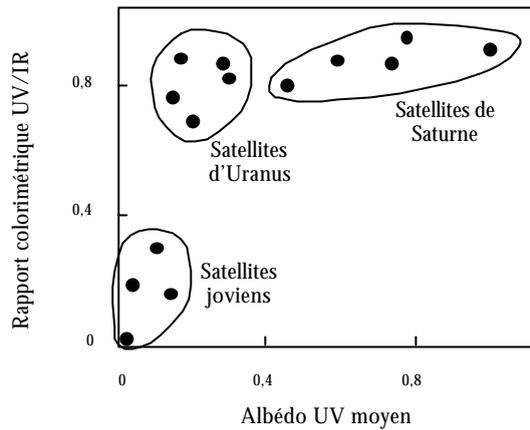


Figure A. Rapport colorimétrique UV/IR en fonction de l'albédo UV des satellites planétaires.

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 f₂O 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 H₂O pure.

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

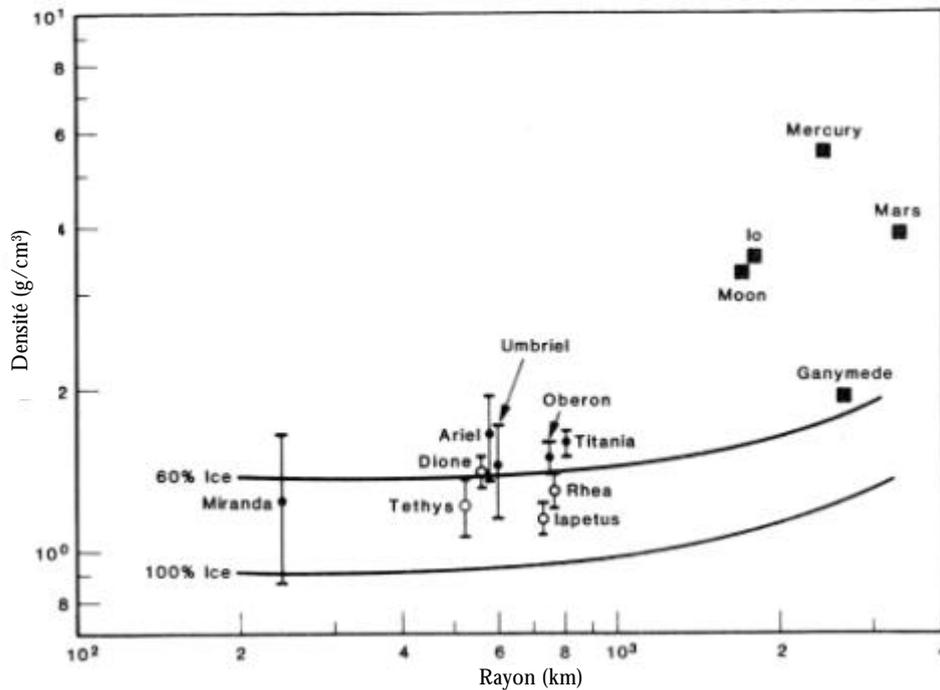
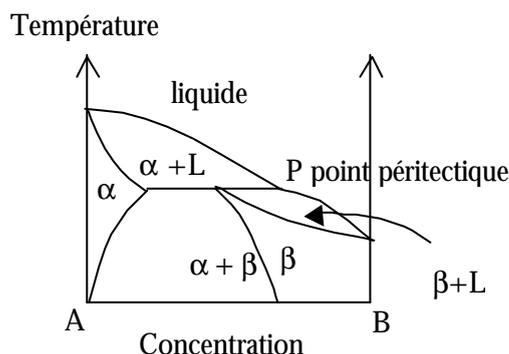


Figure B. Densité en fonction du rayon pour quelques satellites et autres objets célestes du système solaire. Les lignes solides représentent les modèles d'objets composés de glace H₂O pure et d'un mélange glacé eau 60% - silicate 40%.

GLOSSAIRE

- Albédo :** Facteur de réflexion diffuse 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)
- Clathrate :** 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
- Chaleur d'accrétion :** Chaleur dégagée lors de la formation des planètes et des satellites au cours de l'agrégation 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 fumerolles 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.
- Marée 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.
- Péritectique :** mélange P d'un système triphasique mettant en présence une phase liquide et deux phases solides α et β de telle manière que lors de la solidification à la température péritectique $\beta \rightleftharpoons \alpha + P$.



- 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.
- Rhéologie :** Science de la déformation et des écoulements. Comprend notamment l'étude de la viscosité des fluides.

tout volcanisme est associé un écoulement de matière et les auteurs modélisent des relevés topographiques en faisant appel à la mécanique des fluides newtoniens. L'intégration de l'équation de Navier Stokes entielles partielles. Elle leur permet d'évaluer la viscosité de ces ¹⁶ poises (1 centipoise pour l'eau à 20°C). Les auteurs quantifient également l'incertitude des valeurs trouvées.

Allant au-delà de cette exploitation très physique des données, les auteurs extraient des informations sur la composition chimique et sur l'histoire de la formation des satellites Miranda et Ariel. La viscosité dépend de la température. En faisant l'hypothèse que le satellite est de la glace d'eau pure, les valeurs obtenues suggèrent que la température du matériau lors de l'extrusion était proche de 240K. Cette température est supérieure de 170K de la température qui règne à la surface des satellites. Cela indiquerait érieur des satellites. Les deux candidats (chaleur dégagée lors de l'agrégation du satellite ou chaleur liée au phénomène de marée gravitationnelle lors du « frôlement » de deux satellites) sont rejetés. Les auteurs reconsidèrent alors l'hypothèse d'une gl proposent en définitive que les satellites Miranda et Ariel sont constitués d'une glace formée d'un mélange d'eau et de dihydrate d'ammonium, ce dernier étant le matériau extrudé.

Les documents en annexes sont extraits d'autres articles sur la mission Voyager. Ils fournissent des données générales sur les satellites d'Uranus et montrent que leur composition diffère très probablement de la glace d'eau pure. Ils constituent la source d'inspiration des auteurs concernant la composition des satellites. Etant antérieurs (1986 contre 1988), ils démontrent la contribution réelle des auteurs qui s'illustre principalement dans la dérivation des équations des écoulements.

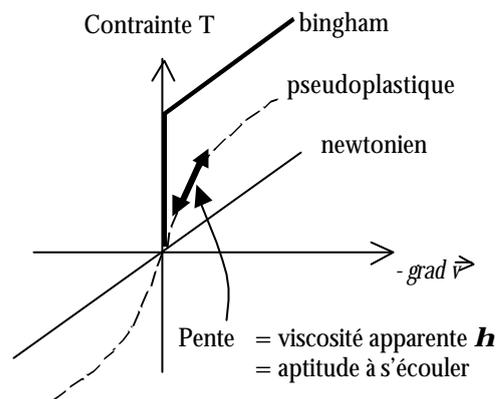
Nous proposons donc aux candidats de réaliser une synthèse des informations p en avant les hypothèses réalisées.

Les **connaissances requises** concernent les disciplines suivantes :

- | | | |
|---|--|----------------|
| 1 | Physique (mécanique des fluides newtoniens) | PC |
| 2 | Chimie (diagrammes de phase solide, stabilité des phases, composition chimique) | PC |
| 3 | Mathématiques (intégration d'équations différentielles partielles multivariées type équation (6)) | Hors programme |

Questions supplémentaires (graduées par ordre croissant de difficulté) :

1. Quelle est la viscosité de l'eau liquide à 20°C ?
2. Quelle est l'incertitude sur la valeur de la viscosité dérivée dans le sujet ?
3. Quelle est la contribution majeure des auteurs de l'analyse présentée d'après les documents fournis ?
- 4.a Qu'est-ce qu'un fluide Newtonien ? Donner un exemple. (programme PC)
- 4.b Exprimer cette loi sur un graphe (contrainte – gradient de vitesse) et relier la notion de viscosité à un élément graphique simple.
5. Qu'est-ce qu'une phase métastable ? Peut-elle exister dans la nature ?
6. Quelle est l'autre loi de viscosité citée dans le texte ? Commenter le comportement des fluides répondant à cette loi.
7. Qu'est-ce qu'un mélange eutectique ? (programme PC). Citer un phénomène analogue rencontré parfois pour l'équilibre liquide – vapeur d'un mélange binaire.



uide - vapeur d'un mélange binaire est l'azéotropie hétérogène (diagramme semblable à celui ci-contre) : une phase vapeur est en équilibre avec un mélange de deux liquides dont la composition globale est la même que celle de la phase vapeur. La notion d'azéotrope homogène (équilibre d'une phase vapeur et d'une phase liquide de même composition) est au programme de la filière PC. La notion d'azéotrope hétérogène n'est pas au programme en tant que telle.

