

ARTICLE DE FOND

Pluton, une planète naine à la morphologie étonnante !

Pierre Thomas, ENS-OSU Lyon

La sonde New Horizon a traversé le système plutonien, le 14 juillet 2015 en passant entre la planète naine Pluton (ex neuvième planète du système solaire) et son satellite Charon à la vitesse relative de 49 000 km/s. Malgré la distance et la vitesse de passage, le nombre de données et ce qui résulte de leur exploitation est stupéfiant, comme l'illustre cet article.

À part les études télescopiques effectuées depuis la Terre, la petite planète Pluton n'est connue que grâce au survol unique qu'a effectué la sonde New Horizons le 14 juillet 2015. Cette mission a permis de préciser certains paramètres physiques et chimiques : rayon (1 186 km), masse volumique ($1 860 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), température superficielle (40 à 50 kelvins), pression au sol (environ 1 pascal), composition de l'atmosphère (90 % de N_2 , 9 % de CO , des traces de CH_4 ...). Pour le reste, on s'attendait à des résultats inédits sur la composition des glaces de surface (cf. article de Thomas Appéré CC 165), sur la dynamique de la très faible atmosphère, sur l'interaction entre les glaces et l'atmosphère... et on n'a pas été déçu. Mais c'est surtout de la morphologie et de l'activité géologique de surface de cette petite planète que sont venues les principales surprises.

Comme il n'y a eu qu'un seul survol, et que seule la moitié éclairée lors de ce survol est connue avec une bonne résolution. Les conclusions « générales » doivent donc être considérées avec réserve.

Un examen morphologique global de la planète révèle trois résultats « majeurs ».

- Il y a une bande sombre à l'équateur, entre les latitudes $+15^\circ$ et -15° . Cette zone correspond à la bande latitudinale la plus chaude au long de toutes

les années plutoniennes (248 années terrestres) qui se suivent pendant un cycle de variation de l'inclinaison de l'axe de rotation (inclinaison variant de 103° à 127° avec une périodicité de 2,8 Ma), bande où il n'y a jamais de nuits polaires. Toutes les glaces superficielles de cette zone se sont sublimées, et il ne reste qu'un mélange de composés « organiques » rougeâtres. Seules les hautes montagnes peuvent être recouvertes de neige de méthane.

- La topographie de Pluton est assez monotone, avec une anomalie majeure : une dépression de plus de 3 000 m de profondeur et de plus de 1 000 km de diamètre, Sputnik Planum, centrée par $+30^\circ$ de latitude nord et 180° de longitude. Cette dépression est sans doute un ancien bassin d'impact, bien qu'on n'en ait pas la preuve formelle. Elle est remplie de glace de diazote (mêlée à un peu de monoxyde de carbone) alors qu'ailleurs dominent les glaces d'eau, de méthane ou des macro-molécules organiques.

- La cratérisation de la surface est très variable, ce qui signifie que l'âge de la surface varie de -4 Ga à -1 Ga . Des processus (érosion, volcanisme ...) ont donc rajeuni inégalement la surface de Pluton. La surface de la dépression Sputnik Planum se caractérise par une absence de cratère de météorite, et a donc un âge géologiquement « nul ».

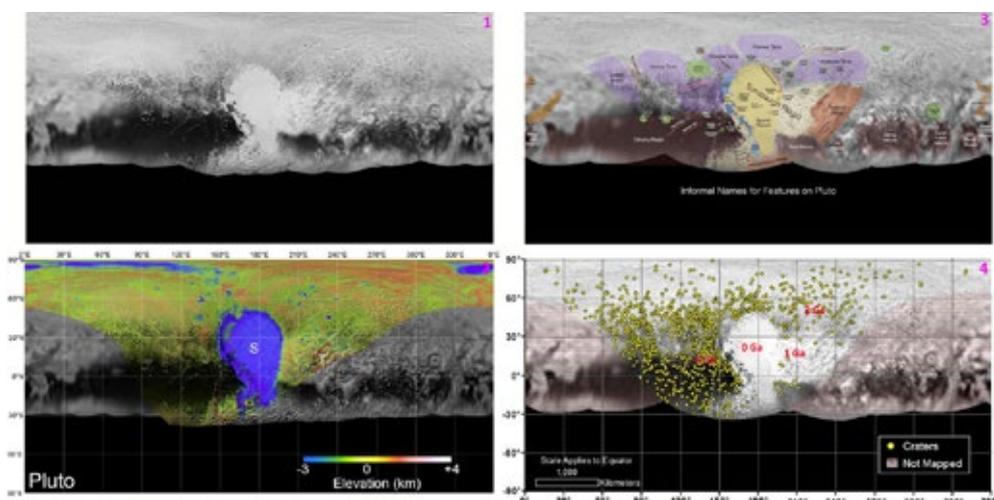


Fig.1. Quatre planisphères (projection cylindrique équivalente de Mollweide) de Pluton, montrant :

(1) la morphologie et l'albédo ;

(2) la topographie ;

(3) les noms (encore informels) des différentes provinces ;

(4) la répartition des cratères d'impact (le faible nombre des cratères aux hautes latitudes est dû à un effet de la projection ; les chiffres en rouge indiquent l'âge des surfaces).

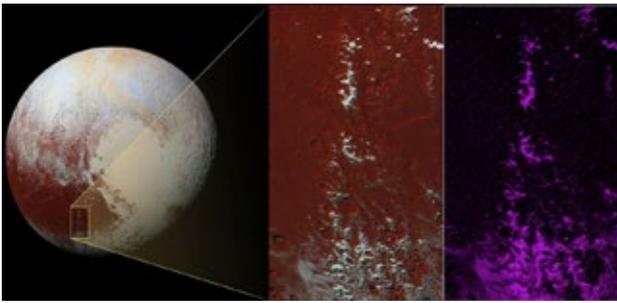


Fig.2. À gauche, vue globale de Pluton (fausses couleurs). Au centre détail d'une montagne couverte de neige au sein de la bande sombre équatoriale. À droite image spectrale montrant l'intensité des bandes d'absorption de la glace de méthane, prouvant que la « neige » est principalement constituée de méthane gelé.



Fig.3. Cratères d'impacts nombreux (surface très âgée) montrant des « terrasses » internes révélant un litage, une « stratification » des premiers kilomètres superficiels de la croûte de glaces. L'origine de ce litage reste à déterminer. La plaine entre les cratères présente un aspect cannelé (fluted en anglais). L'origine de ces cannelures n'est pas claire (érosion éolienne ?). L'image mesure environ 80 km de large.

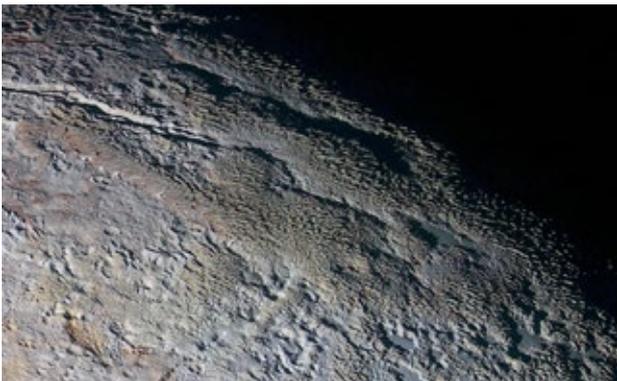


Fig.4. Les terrains en lames (bladed terrain) de Tartarus Dorsa. Des « ondulations » de 70 km de large pour plusieurs centaines de km de long (dorsa) sont découpées en « lames » espacées en moyenne de 5 km. L'origine d'une telle morphologie (appelée snakeskin = peau de serpent lors de sa découverte) serait à rechercher dans la sublimation de la glace, sublimation orientée par des vents ayant une direction dominante de gauche à droite. Ces lames seraient les équivalents de giga-pénitents de neiges connues sur Terre au niveau des hautes altitudes équatoriales. L'image mesure 530 km de gauche à droite.

Dans le détail, l'examen des images (hors Sputnik Planum) permet de tirer des conclusions de 1^{er} ordre sur la structure superficielle de la croûte, la nature de l'érosion, le volcanisme, la tectonique... et aussi des conclusions de 2^e ordre sur l'évolution des conditions de pression et de température de surface, sur la structure profonde...

En plus de l'érosion par le vent qui, si elle génère des formes surprenantes, n'est pas une surprise, la surface de Pluton montre des morphologies ressemblant étonnement à des figures d'érosion « fluviales » dendritiques...). Si cette interprétation est exacte, cela signifie qu'à certaines périodes, un liquide a coulé à la surface de Pluton. Quel composé pourrait être liquide à 45 K et 1 Pa ? De tous les composés présents dans l'atmosphère, c'est le diazote qui semble le plus facile à liquéfier. Mais pour être liquide, N₂ doit être à une température et une pression supérieures à 63,15 K et 1 252 Pa (point triple du diazote). Il faudrait donc, au moins localement, augmenter la température d'une vingtaine de degrés (ce qui ne semble pas insurmontable), et aussi multiplier la pression par plus de 1 252, ce qui semble plus difficile.

Ce serait malgré tout possible parce que l'excentricité de l'orbite de Pluton est de 0,25 (Terre 0,016), et que si l'inclinaison actuelle de l'axe de rotation de Pluton est de 120° (Terre 23,26°), elle varie de 103° à 127° (Terre de 22,1° à 24,5°) avec une période de 2,8 Ma (Terre 41 000 ans). On peut donc modéliser l'insolation (locale ou globale), et calculer les températures superficielles. De là, on peut modéliser la sublimation du diazote et du méthane, calculer la pression, modéliser l'effet de serre et les feedbacks que cela produit... Avec la très grande excentricité de l'orbite, et avec l'inclinaison actuelle de l'axe de rotation (120°), on calcule que la pression peut varier d'environ 10⁻² à 10 Pa au long des 248 ans (terrestres) d'une révolution de Pluton. Mais quand l'inclinaison de l'axe de rotation est minimale (103°), ce qui arrive tous les 2,8 Ma (c'est arrivé il y a 800 000 ans, et cela arrivera de nouveau dans 2 Ma), la pression et la température peuvent dépasser légèrement les conditions du point triple du diazote pendant 1/10 de l'année plutonienne (25 ans terrestres) au cours de l'année plutonienne (de 248 ans terrestres). Il pourrait donc pleuvoir du diazote pendant quelques saisons chaudes et « humides », saisons humides qui durent une vingtaine d'années terrestres et qui reviennent toutes les 11 300 années plutoniennes (2 800 000 années terrestres environ). Pendant ces « brèves » et rares saisons chaudes et humides, des lacs de diazote

liquide pourraient exister quelques « mois » ploutoniens (quelques années terrestres).

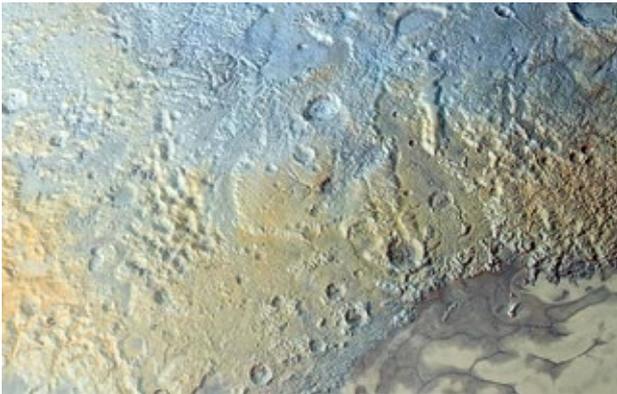


Fig. 5. Région d'environ 450 km d'est en ouest montrant de nombreuses figures ressemblant à des réseaux « hydrographiques » (doit-on dire nitrographiques ?) asséchés. Un réseau avec des petits cours de diazote liquide se rassemblant pour former un cours de diazote principal est bien visible au centre de l'image.



Fig. 6. Un lac de diazote gelé (frozen pond en anglais). Ce lac mesure environ 30 km de long. En haut à droite, le contexte général. En haut à gauche, la vue la plus détaillée de ce lac qui montre des terrasses de retrait. En bas, pour comparaison, un lac tibétain (non gelé donc très sombre) avec les mêmes terrasses de retrait. Ce lac ploutonien est la preuve que pression et température ont permis l'existence de diazote liquide dans des temps pas si lointains dans le passé de Pluton.

À côté des manifestations d'une activité géologique d'origine externe, la surface de Pluton montre aussi des manifestations d'activité d'origine interne : volcanisme et tectonique.

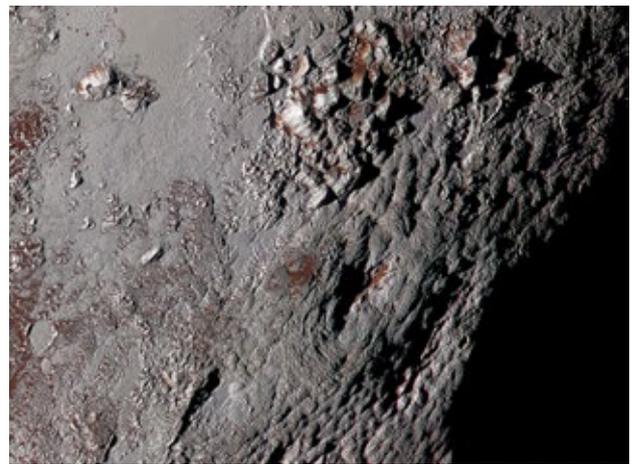


Fig. 7. Vue sur Wright Montes, une « montagne » (150 km de diamètre, 4 000 m de haut) affectée d'un cratère sommital, qui fait penser à un volcan, à un cryovolcan puisque la « lave » qui en sortait était sans doute un mélange d'eau et de matières organiques en train de geler. Un seul cratère d'impact est identifiable sur Wright lui-même, suggérant que ce « volcan » a été actif très tardivement dans l'histoire de Pluton.



Fig. 8. Réseau de failles normales et de graben recoupant de nombreux cratères d'impact, dont le cratère Elliot au centre droit de l'image. Comme toute faille normale, ces failles résultent d'une extension. Les failles recoupant tous les cratères sont géologiquement « jeunes ». La photo couvre une région d'environ 240 km de large.

On trouve de nombreuses failles normales (associées en graben) semblables à celles de la figure 8 un peu partout à la surface de Pluton. Elles sont partout géologiquement « jeunes ». Rappelons que les failles normales sont dues à une extension. Et, chose étonnante, on ne connaît aucune structure que l'on puisse interpréter en termes de compression (pas de plis, pas de faille inverse...). Si on voit de nombreuses structures extensives et aucune structure compressive, c'est que la surface de Pluton est partout en extension. Pluton aurait donc « gonflé ». Comment faire gonfler une planète ?

Pluton a une masse volumique de $1\,860\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Si on suppose qu'il est constitué d'un mélange de glaces, principalement de glace d'eau (masse volumique voisine de $1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) et de « roches » (mélange

silicates + fer, de masse volumique voisine de $4000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), et si on suppose que Pluton est entièrement différencié (roches au centre, glaces en périphérie), on obtient un Pluton constitué d'un manteau d'environ 300 km d' H_2O et autres composés volatils et organiques, surmontant un noyau d'environ 900 km de rayon fait de « roches ». Les modélisations thermiques montrent qu'il est possible que la base de ces 300 km d' H_2O ait été ou soit encore liquide et qu'il ait existé ou existe encore un océan liquide profond sous une épaisse couche de glaces. Pour faire gonfler Pluton, il suffit de faire geler entièrement ou partiellement cet océan majoritairement constitué d'eau liquide. On peut peaufiner le raisonnement. Quand de l'eau gèle à basse pression, elle donne de la glace I, ce qui s'accompagne d'une augmentation de volume. Par contre, si elle gèle à haute pression, elle donne des glaces de haute pression (glace III, V, VI ou VII) ce qui s'accompagne d'une diminution de volume¹. Sur Pluton, en fonction notamment de la faible gravité, de l'eau gelant à une profondeur inférieure à 260 km donnerait de la glace I, ce qui se traduirait par une augmentation de volume. Par contre, de l'eau gelant à une profondeur supérieure à 260 km traduirait des glaces III, V ou VI, ce qui se traduirait par une diminution de volume. Comme aucune structure compressive n'a été observée, c'est que jamais des glaces de haute pression n'ont cristallisé.

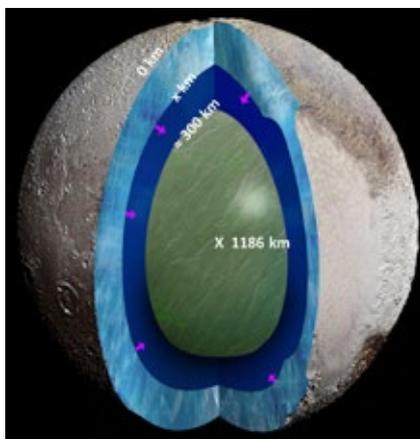


Fig.9. Modèle probable de la structure interne de Pluton : environ 300 km d' H_2O (couleurs bleues, bleu clair pour la glace, bleu foncé pour l'eau liquide) surmontant environ 900 km de roche (couleur verte). Les modélisations thermiques montrent qu'il est possible que la base de cette couche d' H_2O soit encore liquide. Les modèles comportent trop d'inconnues pour que l'on puisse raisonnablement calculer la profondeur x de la limite solide/liquide. L'absence de structure compressive visible à la surface montre que la profondeur x du front de congélation est inférieure à 260 km . Dans le cas d'une couche d' H_2O de 300 km d'épaisseur, l'océan liquide basal aurait donc une épaisseur supérieure à 40 km .

¹ Voir <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/eau-glace-pression.xml>

Si la couche d' H_2O fait bien 300 km d'épaisseur, cela signifie que le front de congélation n'a pas encore atteint 260 km de profondeur, et qu'il reste au moins 40 km d'épaisseur d'eau liquide.

Sputnik Planum (figures 10-11) est une caractéristique morphologique majeure de Pluton. Sa position au centre de la face « anti-Charon » suggère qu'elle correspond à une anomalie de masse positive, due à une épaisseur de glace d'eau plus faible (donc à une épaisseur d'océan liquide plus forte) et à un remplissage par de la glace de diazote (de masse volumique $\rho = 1030 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, supérieure à celle de la glace d'eau $\rho = 930 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Son origine, sans doute un ancien bassin d'impact de plus de 1000 km de diamètre, n'est pas totalement comprise. Mais, à côté de ces questions « géophysiques », Sputnik Planum montre des morphologies de surface étonnantes. Voyons en quelques-unes.



Fig.10. Vue oblique globale de Sputnik Planum vue depuis l'OSO. Noter les terrains chaotiques à gauche de la plaine, terrains chaotiques détaillés sur les deux images suivantes.

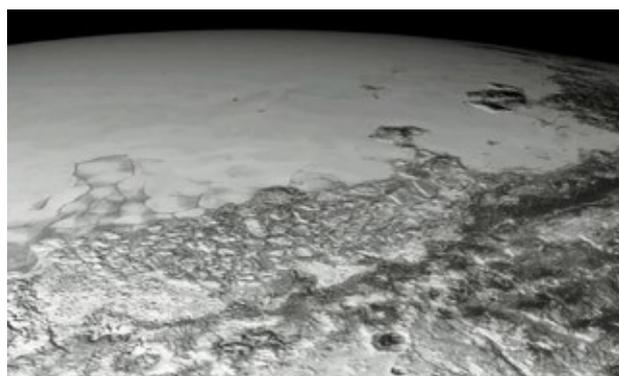


Fig.11. Vue rasante de la bordure nord-ouest de Sputnik Planum. Entre le plateau cratérisé (en bas de l'image) et la plaine de Sputnik Planum (en haut), se trouve un terrain chaotique fait de gros blocs basculés. Le rebord du plateau se serait fracturé et aurait « glissé » vers Sputnik Planum. Cette image couvre environ 500 km de gauche à droite.

Toutes les images de Pluton présentées dans cet article proviennent des différents sites web de la NASA et de l'université Johns Hopkins de Washington.

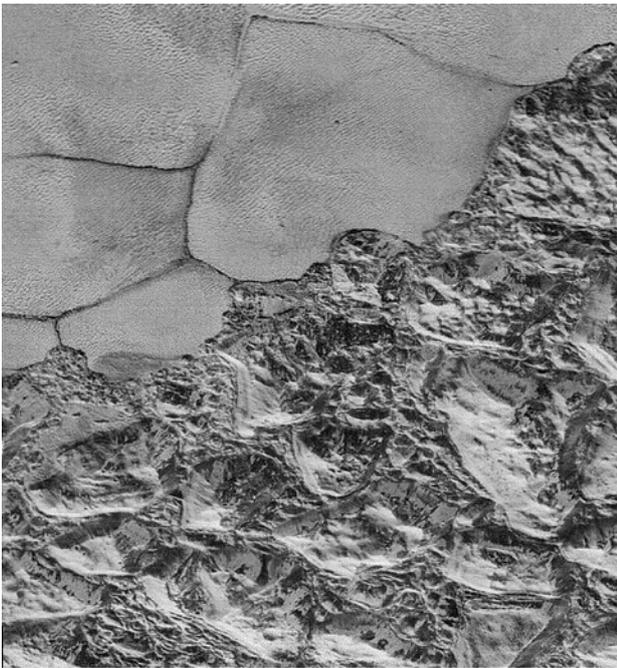


Fig.12. Détail de la limite entre la plaine de Soutnik Planum et les terrains chaotiques, giga blocs de glace d'eau ayant glissé depuis le plateau en direction de la plaine. Cette image couvre environ 75 km de gauche à droite.

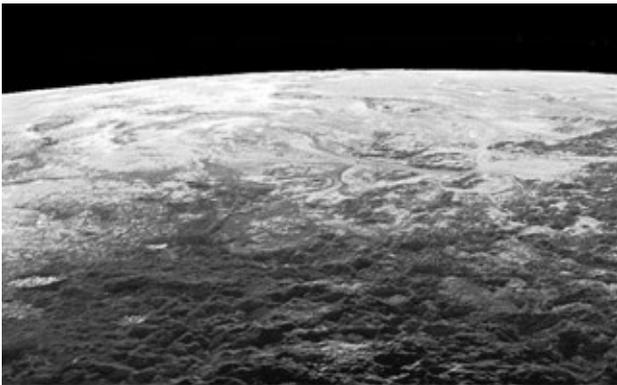


Fig.13. Photo oblique de la bordure SSE de Sputnik Planum. Des montagnes de glace d'eau noircies par des molécules organiques (au 1^{er} plan) dominent Sputnik Planum (à l'arrière-plan). Des glaciers de glace de diazote sont visibles au centre de l'image. Ils descendent des montagnes pour s'étaler dans la plaine.

Des glaciers de diazote coulent des montagnes sud vers Sputnik Planum et s'y étalent. Par contre, ce qui ressemble à des glaciers dans Sputnik Planum semble s'écouler vers le nord, en direction de sa bordure, pourtant constituée de montagnes. Des modélisations climatiques, prenant en compte la topographie, les paramètres astronomiques..., ont été développées par le Laboratoire de Météorologie Dynamique de Paris et peuvent expliquer ce qui ne semble pas logique. Ces modélisations montrent que sur un cycle de variation de l'obliquité de l'axe de rotation de Pluton (cycle de 2,8 Ma), la partie nord de Sputnik Planum perd de la matière par sublimation du diazote. Cette perte de glace de diazote peut être estimée à 1 000 m d'épaisseur sur un cycle de 2,8 Ma.

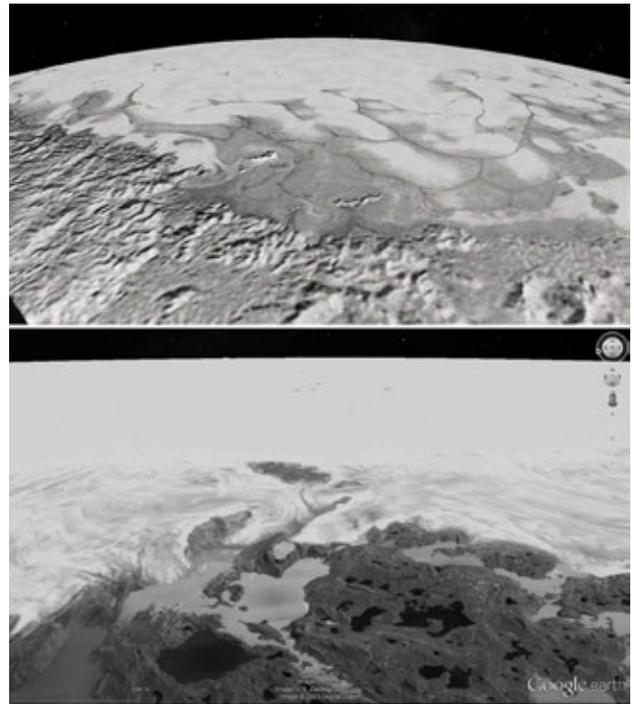


Fig.14. En haut, vue rasante (prise en direction du sud) de la limite nord de Sputnik Planum. Ce qui ressemble à des glaciers coule de la plaine (en haut de l'image) vers la limite Plaine-montagne (en bas de l'image). Ce sens d'écoulement suggère que le centre de Sputnik Planum a une altitude plus élevée que sa bordure nord. Cette image couvre une zone d'environ 300 km de gauche à droite.

En bas, pour permettre une comparaison morphologique, image de glaciers de la bordure ouest du Groenland.

Selon ces mêmes modèles, ce diazote va se condenser au sud de Sputnik Planum et sur les montagnes bordières (condensation estimée à 750 m d'épaisseur sur un cycle de 2,8 Ma).

Si ces simulations montrent une condensation globale au sud de Sputnik Planum sur un cycle de 2,8 Ma, elles montrent que ce même sud de Sputnik Planum subit (temporairement) une sublimation globale au cours de l'année plutonienne (248 ans) dans la situation orbitale actuelle. Cette sublimation qui a lieu au sud depuis quelques années plutoniennes expliquerait les étranges puits que la sonde New Horizons a découverts dans ces régions.

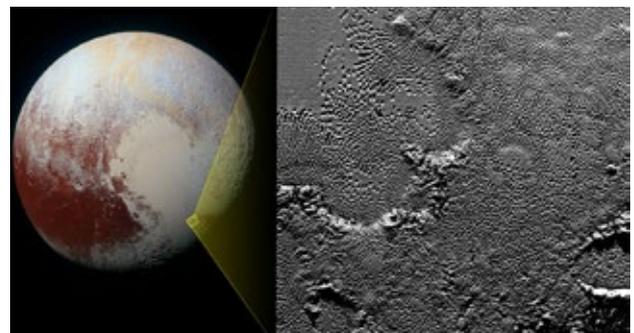


Fig.15. Puits affectant la région SSE de Sputnik Planum. Ces multiples dépressions sont interprétées en termes de sublimation.

La surface de Sputnik Planum montre un réseau polygonal de bombements limités par des sillons. Ces figures sont interprétées comme l'expression superficielle d'une convection (à l'état solide) de la glace de diazote constituant le plancher de Sputnik Planum. À un facteur 1000 près, cette surface ressemble à celle d'un lac de lave figée, comme on peut en voir à Hawaï par exemple. En donnant à la glace de diazote des paramètres physiques « normaux », et avec un flux thermique « classique » vu la taille et la masse de Pluton, on peut calculer que la convection est possible pour une épaisseur de remplissage supérieure à 1 500 m.

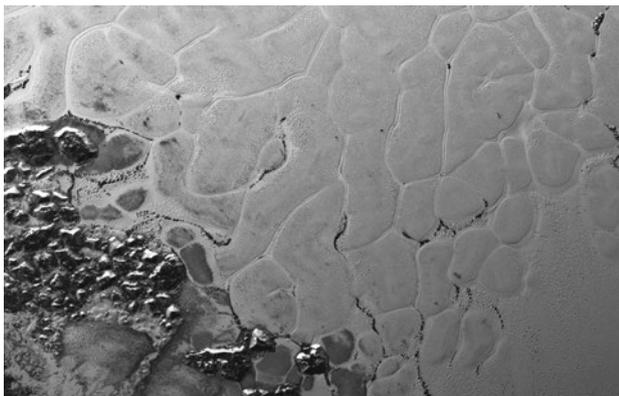


Fig.16. Réseau de cellules polygonales affectant la surface de Sputnik Planum. Ce réseau polygonal est interprété comme l'expression superficielle d'une convection à l'état solide de la couche de glace de diazote remplissant Sputnik Planum. Chaque cellule mesure de 20 à 30 km de « diamètre ». Ces cellules sont bombées en leur centre (panache ascendant). Les sillons bordiers correspondraient aux parties descendantes des cellules.

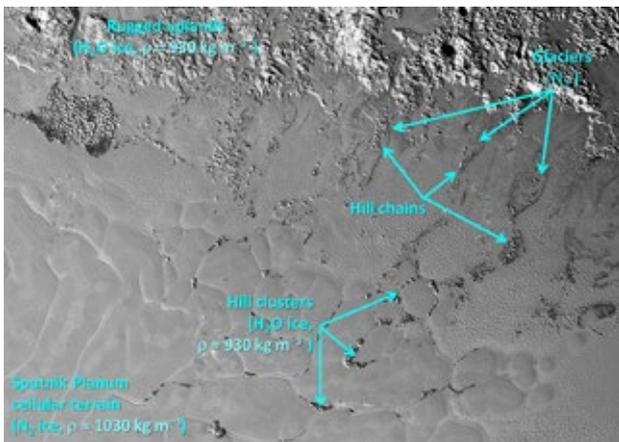


Fig.17. Image annotée de la bordure SE de Sputnik Planum. Des glaciers de diazote descendent des montagnes (rugged uplands) faites de glace d'eau. Ces glaciers transportent des blocs de glace d'eau jusqu'à la plaine, où ils vont former des « cordons morainiques » (hill chains). Ces blocs de glace d'eau sont repris et déplacés par la convection de la glace de diazote. Ne pouvant couler à cause de leur faible masse volumique, ils s'accumulent au niveau des sillons, branches descendantes des cellules de convection vues en coupe figure 18 (Hill clusters).

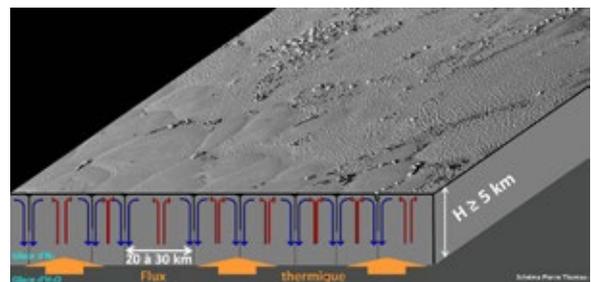


Fig.18. Schéma simplifié de la convection interne à Sputnik Planum expliquant la morphologie de surface (réseau polygonal, hill clusters...).

Il y a une interaction « étrange » entre la convection interne à Sputnik Planum et les glaciers venus des montagnes au SE de la région. Les glaciers de diazote « coulent » sur des montagnes faites de glace d'eau. Ces glaciers arrachent des blocs de glace (qui ont signification de moraines) et les transportent jusqu'à la plaine. Arrivés au niveau de la plaine, ces blocs de glace d'eau ($\rho = 930 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) flottent sur la glace de diazote ($\rho = 1\,030 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) et « dérivent » vers le centre de la plaine. Puisque ces icebergs de glace d'eau dérivent, c'est qu'ils flottent sur la glace de diazote sans en toucher le fond. L'estimation de la hauteur des plus grands de ces icebergs (500 m) et l'application du principe d'Archimède montrent que la glace de diazote a une épaisseur d'au moins 5 000 m.

Depuis 1959 avec la face cachée de la Lune puis 1965 avec la mission Mariner 5 qui a survolé Mars, l'humanité explore le Système solaire, ses planètes et ses satellites. À quelques rares exceptions près, chaque survol a révélé un monde extraordinaire, avec une morphologie souvent totalement inattendue. Pluton, le dernier gros corps (plus de 1 000 km de diamètre) à être survolé a lui aussi fourni son lot de surprises. Qui aurait imaginé les terrains en lames, les réseaux hydrographiques, les champs de puits, l'extraordinaire Sputnik Planum... ? Espérons que chacun d'entre nous a bien profité des nouvelles de cette année 2015. En effet, Pluton est le dernier « gros » corps (à morphologie totalement inconnue) à être survolé, et il n'y aura pas de prochains survols semblables avant longtemps. Toutes les planètes et leurs satellites, les plus gros astéroïdes... ont déjà été visités, et il va falloir attendre les survols des autres planètes naines (Eris, Makemake, Haumea...) pour avoir d'aussi belles surprises sur des « gros » corps. Et aucune mission vers ces corps lointains n'est pour l'instant programmée. Heureusement, il reste des petits corps à explorer, qui eux aussi révèlent des surprises comme nous l'a montré Ultima Thulé survolé le 1^{er} janvier 2019 par la même sonde New Horizons.