

La mission Rosetta et le calcul de la gravité

■ Julien LAURENT-VARIN - Eric JURADO

La mission Rosetta a été, et est, un succès historique pour les activités spatiales européennes. Pour accomplir cet exploit une des étapes nécessaires était la construction du champ de gravité de ce corps. Ce pré-requis indispensable au calcul de trajectoire, a permis de mettre en œuvre le processus de sélection du site d'atterrissage de Philae. Cet article décrit ce processus de sélection ainsi que les méthodes et algorithmes appliqués dans le calcul du champ de gravité de la comète Churyumov-Gerasimenko 67P.

MOTS-CLÉS

Rosetta, Philae, trajectoire d'atterrissage, champs de gravité, harmoniques sphériques

Introduction

Le 12 novembre 2014, le grand public avec tous les centres spatiaux a tourné son regard vers l'atterrissage du *lander*¹ Philae, de la mission Rosetta, sur la comète Churyumov-Gerasimenko, et ce à plus de trois unités astronomique de la terre². Outre les perspectives scientifiques de cette mission, cette réussite est un exploit technique de grande ampleur, qui a nécessité un très long travail de mise au point sur de nombreuses années. La trajectoire à elle seule, a duré plus de dix ans – du tir en Guyane le 2 mars 2004 à l'atterrissage le 12 novembre 2014. Il a fallu, en effet, adopter un parcours complexe dans le système solaire avec plusieurs assistances gravitationnelles de la Terre et de Mars (Terre-Mars-Terre-Terre) pour atteindre l'orbite très excentrique de la comète cible. Durant son voyage la sonde Rosetta a traversé deux fois la ceinture d'astéroïde où elle put observer Stein (5 septembre 2008) et Lutetia (10 juillet 2010) et obtenir ainsi des photos et des mesures scientifiques d'une qualité remarquable. Même si tous les systèmes n'ont pas fonctionné parfaitement, comme par exemple les harpons d'ancrage, la mission de Philae est une réussite et permet de réaliser des mesures scientifiques *in situ*, ce qui est une première historique.

Pour réussir cette mission plusieurs agences spatiales se sont coordonnées dont l'ESA et le CNES. Ce dernier avait la responsabilité de Philae et du choix du site de "touchdown", qui devait faire le consensus entre les objectifs scientifiques et les contraintes opérationnelles (voir [DR1]). C'est dans ce processus de choix que de nombreuses simulations de trajectoire de descente de Philae ont été calculées par les équipes de dynamique du vol du projet. Afin de réduire au

plus les risques déjà très élevés. Il était alors indispensable de disposer d'un modèle de comète le plus précis possible étant données les mesures disponibles au fur et à mesure de l'approche du corps. En particulier, la gravité, qui tient un rôle majeur dans la dynamique de la descente de Philae, devait être connue avec le plus de précision possible. Mais comment atteindre cet objectif de précision alors que nous ne disposions que de la forme, et de très peu de mesures ?

Après une présentation du contexte scientifique de la mission et des éléments importants de la prise de décision du choix du site d'atterrissage, nous allons montrer comment a été mis en œuvre ce calcul de gravité via des techniques développées dans les années 90 et avant. Nous présenterons enfin les résultats obtenus et les limitations de ceux-ci.

■ Contexte et ambitions scientifiques

Suite au succès de la sonde Giotto qui a observé la comète de Halley le 14 mars 1986, il a été décidé de réaliser une mission beaucoup plus ambitieuse avec l'ESA en collaboration avec plusieurs agences. En effet, Giotto a croisé la comète avec une vitesse relativement importante, et ainsi les résultats scientifiques ne pouvaient être que limités. Pour Rosetta, l'objectif était de rester en orbite autour d'une comète, et même de se poser sur celle-ci pour réaliser des mesures en surface. La mission était technologiquement très ambitieuse, mais devait permettre de répondre à de nombreuses questions concernant la formation du système solaire, la formation des océans sur terre ainsi que de confirmer une théorie d'ensemencement de la terre de molécules carbonées ancêtres des acides aminés. Par cette dernière mesure, l'explication de l'apparition de la vie sur terre pourrait être complétée.

Ainsi pour atteindre tous ces objectifs, la sonde Rosetta, et le *lander* Philae, embarquent un arsenal d'instruments très important dont des spectromètres, des instruments optiques et radios, des analyseurs de poussières, etc. (voir [DR5])

■ Le choix du site d'atterrissage

Le processus de sélection du site d'atterrissage était complexe et impliquait de nombreuses équipes scientifiques et techniques. Quatre centres spatiaux étaient impliqués dans ces opérations. La sonde Rosetta a été opérée depuis le centre opérationnel de l'ESOC (*Rosetta Mission Operations Center*, RMOC) à Darmstadt. La programmation des instruments scientifiques a été réalisée depuis l'ESAC près de Madrid (*Rosetta Science Ground Segment*, RSGS). Philae a été opéré depuis le centre de contrôle du DLR à Cologne (*Lander Control Centre*, LCC), et le SONC (*Science Operations and Navigation Centre*) au CNES Toulouse a été responsable de la planification des observations et des activités

1 Atterrisseur, un vaisseau spatial conçu pour atterrir sur la surface d'un corps céleste.

2 L'unité astronomique (au), approximativement la distance Terre-Soleil vaut 149 597 870 700 mètres exactement.

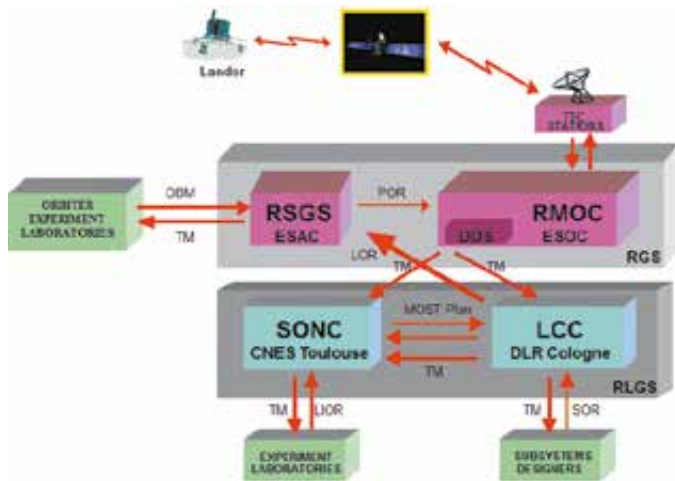


Figure 1. Les centres de contrôle et de mission de Philae et de Rosetta

de navigation de l'atterrisseur. Ces deux derniers centres constituaient le segment sol de l'atterrisseur (*Rosetta Lander Ground Segment*, RLGS). L'ESA, en tant que responsable de la mission Rosetta, était en charge de planifier les opérations jusqu'à la séparation. Le RLGS, lui, était en charge de proposer à l'ESA le site d'atterrissage du Lander, une coopération étroite entre tous les acteurs était indispensable et a donc été mise en place. Le schéma de la Figure 1 illustre les liens mis en place entre les différents centres.

Le processus de sélection du site d'atterrissage suivait le rythme des observations, au fur et à mesure que la sonde s'approchait de la comète, de plus en plus de détails ont été captés par les instruments de la sonde. Ainsi ce processus de sélection a été jalonné par trois dates clés où une première liste de 5 sites candidats a été définie puis cette liste a été réduite jusqu'à un site final unique. Ceci a été réalisé par la

Table 1. Les dates clés du processus de sélection du site d'atterrissage.

Jour avant Atterrissage	Date/distance minimum à la comète pour les observations	Jalon
L-80	24/08/2014 50 km	RLGS a proposé 5 sites candidats à l'ESA, afin que l'agence européenne étudie la faisabilité opérationnelle de l'atterrissage.
L-58	14/09/2014 30 km	RLGS a proposé à l'ESA un site nominal et un site "backup" pour que l'agence européenne calcule la trajectoire de séparation de Rosetta.
L-30	12/10/2014 10 km	RLGS a confirmé le choix du site nominal et la préparation des opérations a pu commencer.

mise en commun des données reçues et calculées par les équipes scientifiques et techniques. Il est important de préciser qu'entre le moment où la première image détaillée de la comète a été reçue, et le choix final du site d'atterrissage, moins de deux mois se sont écoulés. C'est un délai très court, et véritablement inhabituel pour ce type de mission, ayant obligé les équipes à travailler parfois en continu 24 h/24.

■ L'influence de la gravité

Un grand nombre de contraintes ont été prises en compte dans la sélection du site d'atterrissage et le calcul de la trajectoire de descente (calcul des pentes, calcul de l'ensoleillement du site visé...). De plus, une des particularités de Rosetta est qu'être en orbite autour d'une comète est bien plus complexe que d'orbiter autour d'un autre corps comme un astéroïde par exemple, en raison des perturbations liées aux forces aérodynamiques induites par le dégazage³. Une imprécision supplémentaire sur le modèle de gravité n'aurait pas permis de réaliser la mission. Ainsi, c'est en raison du risque lié à l'impact de ce dégazage sur la navigation que Rosetta n'a pas pu s'approcher "très près" de la comète. Ainsi, la stratégie mise en place pour assurer la sécurité de la sonde, tout en permettant à l'atterrisseur de se poser, a conduit à une séparation depuis une altitude de 22.5 km, Philae tombant ensuite en chute libre vers la comète. La zone d'atterrissage prévue était une ellipse de 500 m sur 400 m. Cette incertitude sur l'impact était principalement dû aux incertitudes sur la position de Rosetta à l'instant de la séparation.

Dans ces conditions, la bonne connaissance du champ de gravité était absolument nécessaire, une mauvaise estimation de la position du centre de masse ou de la valeur du GM⁴ pouvant compromettre la sécurité de la mission.

Des études amont [DR6] avaient également permis de montrer que le choix du site lui-même était fortement influencé par la gravité de la comète. Ainsi, il était connu que pour une comète avec une densité relativement élevée (au-dessus de 600 kg.m⁻³ environ), il y avait beaucoup moins de zones accessibles à la surface de la comète. Cela était dû au fait que lorsque la densité de la comète augmente, la vitesse orbitale de la sonde augmente également, or la capacité en terme de variation de vitesse (Delta V) limitée du mécanisme d'éjection restant identique, celui-ci n'aurait plus permis de réaliser l'atterrissage sur certaines zones de la comète.

Le calcul du champ de gravité

Quelle surprise en juillet 2014, de découvrir les premières images de Chury. La comète était loin d'être une sphère, et donc la gravité ne serait certainement pas standard. Toutes les approximations des corps essentiellement sphériques ne pouvaient pas s'appliquer. Dès ces premiers instants nous

³ A la surface d'une comète s'approchant du soleil, des composés chimiques (CO₂, H₂O,...) subliment. Un flux gazeux s'échappe alors du noyau de la comète, c'est le dégazage.

⁴ GM : paramètre de gravitation standard, produit de la constante de gravitation universelle G (=6.673e-11 m³kg⁻¹s⁻²) et de la masse M du corps attracteur.



savons que la modélisation en harmoniques sphériques (HS) allait être difficile.

En août, les premières images d'OSIRIS ont été traitées, et une première forme a été estimée comme un polyèdre de 20 480 facettes. A cette échéance, la sonde Rosetta était encore très loin de la comète, et il était impossible d'estimer l'amplitude de cette gravité (le GM) puisque la trajectoire de la sonde ne subissait pas l'influence de celle-ci. Il a donc été décidé dans un premier temps de réaliser les calculs avec trois hypothèses de densités homogènes :

- 100 kg.m⁻³ (GM de 135.4 m³.s⁻²),
- 370 kg.m⁻³ (GM de 501 m³.s⁻²) et
- 800 kg.m⁻³ (GM de 1 083 m³.s⁻²).

Sans informations complémentaires concernant la structure interne du corps, nous ne pouvions pas adopter une autre hypothèse que celle de la répartition homogène de la masse dans le corps, ainsi connaissant le volume, une hypothèse de densité était équivalente à une hypothèse sur le GM.

Dès septembre la forme se précise et le traitement des images OSIRIS nous permet de disposer d'un polyèdre de 464 862 facettes. Le RMOC s'appuyant sur les images des caméras opérationnelles génère lui aussi un modèle de forme de 250 032 facettes. Les équipes de navigation ont, de plus, observé l'infléchissement de la trajectoire par la gravité de Chury, et estimé une première valeur de GM de 660 m³.s⁻².

Par ailleurs, si l'on dispose de mesures radio science (doppler), les premiers coefficients du développement en harmoniques sphériques peuvent être évalués. Ainsi l'hypothèse de répartition des masses homogène peut être validée.

L'intérêt de disposer d'un modèle de gravité précis est de réaliser des simulations de trajectoire de *landing* précises elles aussi. Or, au vu de la forme de Chury, nous ne pouvions nous contenter d'un calcul en harmonique sphérique pour lesquels la convergence n'est garantie qu'à l'extérieur de la sphère de Brioullin (plus petite sphère contenant la totalité des masses générant le champ de gravité). Ainsi, il a été décidé de réaliser deux calculs en parallèles pour chaque jeu de forme/densité pour lesquels l'équipe d'analyse de mission voulait évaluer des trajectoires.

Le schéma de la *Figure 2* présente les étapes de calcul et les trois outils mis en œuvre :

- ANALHS_MC : outil d'analyse des harmoniques sphériques

(HS) par moindres carrés,

- TOPOGRAV : outil permettant le calcul du champ de gravité lorsque l'on connaît la topographie du corps sous forme d'HS, et

- Intégration : outil construit pour l'occasion permettant le calcul de l'accélération du champ de gravité sur une grille de discrétisation englobant le modèle de forme décrit par un polyèdre.

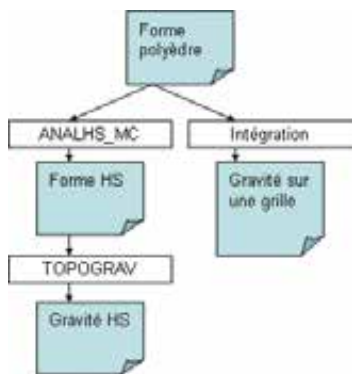


Figure 2. Processus de calcul

Le paragraphe suivant présente ce qui est réalisé pour obtenir le développement en HS de la topographie lorsque l'on dispose de la forme, la suite traitera du calcul de la gravité en HS lorsque l'on dispose de la topographie en HS, et enfin sera présenté le calcul nécessaire pour disposer de l'accélération de la gravité en un point quelconque de l'espace à partir d'une forme polyédrique.

■ Développement de la topographie en Harmoniques Sphériques

Par définition, chercher le développement en harmoniques sphériques se rapprochant le plus possible d'une forme polyédrique consiste à trouver les paramètres de la fonction HS (les coefficients d'HS) minimisant les distances entre le modèle et les points appartenant à la surface. Dans les calculs les points pris en compte sont les sommets du polyèdre.

Il est nécessaire de souligner que le développement d'une topographie en HS, exige que cette topographie soit étoilée⁵, ce qui n'est pas forcément le cas. Malgré tout, le problème de moindre carré étant bien posé, il existera toujours une solution qu'il faudra comparer avec la forme originelle pour évaluer sa validité.

Posons les notations suivantes :

$$\begin{cases} r_X(\phi, \lambda) = R_0(1 + S_X(\phi, \lambda)) \\ S_X(\phi, \lambda) = \sum_{j \geq 1} \sum_{k=0}^j (A_{jk} \cos k\lambda + B_{jk} \sin k\lambda) P_{jk}(\sin \phi) \\ X = (R_0, (A_{jk})_{jk}, (B_{jk})_{jk}) \end{cases} \quad (1)$$

- Où r_X est la fonction topographie paramétrée par X , qui à chaque longitude λ , latitude ϕ associe une distance au centre ;

- R_0 est un paramètre de dilatation,

- les paramètres A_{jk} , B_{jk} sont les coefficients que l'on cherchera,

- J est l'ordre du développement, et

- S_X est une fonction introduite pour simplifier les écritures.

Les P_{lm} sont les fonctions associées de Legendre :

$$P_{lm}(u) = \frac{(1-u^2)^{m/2}}{2^l l!} \frac{d^{l+m}}{du^{l+m}} [(u^2-1)^l] \quad (2)$$

Finalement, le problème que résout ANALHS_MC est le problème d'optimisation par moindres carrés suivant :

$$\text{Min}_X \|r_X(\phi_i, \lambda_i) - r_i\|^2 \quad (3)$$

Où les (r_i, ϕ_i, λ_i) sont les coordonnées sphériques des sommets du polyèdre.

A l'issue du processus d'optimisation, que nous ne présentons pas, nous disposons des harmoniques sphériques de la forme que nous transformons pour adopter le formalisme de la mécanique quantique (voir [DR2]) ; posons les fonctions harmoniques de surface normalisées :

$$Y_l^m(\phi, \lambda) = \frac{(-1)^m}{\sqrt{4\pi}} \left[\frac{(2l+1)(l-m)!}{(l+m)!} \right]^{1/2} P_{lm}(\sin \phi) e^{im\lambda} \quad (4)$$

⁵ Un domaine de l'espace est dit étoilé, s'il existe un centre depuis lequel tout point de la frontière du domaine puisse être relié par un chemin rectiligne inclus dans le domaine.

Le coefficient de normalisation :

$$N_{lm} = \sqrt{\frac{(2 - \delta_{0m})(2l + 1)(l - m)!}{(l + m)!}} \quad (5)$$

Ainsi que les coefficients complexes :

$$T_j^m = (-1)^m \sqrt{\frac{4\pi}{2 - \delta_{0j}}} \frac{A_{j\ell} + iB_{j\ell}}{N_{j\ell}} \quad (6)$$

Dans ces conditions la fonction S peut s'écrire :

$$S = \sum_{n=1}^N T_{j_n}^{q_n} Y_{j_n}^{q_n}(\phi, \lambda) \quad (7)$$

Avec :

$$q_n = n - j_n(j_n + 1), \quad j_n = \lfloor \sqrt{n} \rfloor, \quad N = (J + 1)^2 - 1$$

Par abus, nous omettons l'indice X de S pour ne pas alourdir les notations. Il suffit maintenant de calculer les coefficients du champ de gravité dont la forme est décrite par ce développement en HS, et où la répartition des masses est homogène.

■ Calcul du champ de gravité en Harmoniques Sphériques

En coordonnées sphériques, le potentiel de gravité est souvent représenté sous la forme d'un développement en fonctions sphériques, avec le formalisme quantique nous pouvons noter :

$$U(r, \phi, \lambda) = \frac{GM}{r} \sum_{l=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^l \sum_{m=-l}^l K_l^m Y_l^m(\phi, \lambda) \quad (8)$$

- G : constante de gravitation universelle ($6,673 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$),
- M : masse du corps,
- R : rayon de référence (généralement rayon équatorial),
- K_l^m : coefficient du développement.

Dans ces conditions les coefficients vérifient :

$$K_l^m = \frac{4\pi}{2l + 1} \frac{1}{MR^3} \iiint_V r^l Y_l^{m*}(\phi, \lambda) dM \quad (9)$$

Où V , est le volume du corps, et la notation $*$ représente la conjuguée complexe. En remplaçant r par son expression (1), puis en intégrant selon la coordonnée radiale sachant que l'élément de masse $dM = \rho r^2 dr d\sigma$, avec ρ la densité, et $d\sigma$ la mesure d'angle solide. Il vient :

$$K_l^m = \frac{4\pi \rho R_0^3}{(2l + 1)(l + 3)M} \left(\frac{R_0}{R}\right)^l \iint_{\sigma_1} (1 + S)^{l+3} Y_l^{m*} d\sigma \quad (10)$$

Nous utilisons alors le binôme :

$$(1 + S)^{l+3} = \sum_{H=0}^{l+3} \binom{l+3}{H} S^H \quad (11)$$

Et nous définissons :

$$K_l^m(H) = \frac{4\pi \rho R_0^3}{(2l + 1)(l + 3)} \left(\frac{R_0}{R}\right)^l \binom{l+3}{H} \iint_{\sigma_1} S^H Y_l^{m*} d\sigma \quad (12)$$

Il reste donc à calculer cette dernière intégrale. Deux approches sont alors possibles :

- **La méthode analytique** consiste à développer chaque terme, à les calculer, puis à les sommer en étant attentif à la précision, car certaines contributions sont très petites alors que d'autres sont bien plus importantes.

- **La méthode numérique** consiste à exploiter la possibilité de faire une analyse harmonique des S^H et de les exploiter.

Partie "méthode analytique"

En remplaçant S par son expression (7) dans l'équation (12) puis en développant selon le multi-nôme et en introduisant la notation de multi-indices, nous obtenons :

$$K_l^m(H) = \frac{4\pi \rho R_0^3}{(l + 3)(2l + 1)} \left(\frac{R_0}{R}\right)^l \binom{l + 3}{H} \sum_{|\alpha|=H} \frac{H!}{\alpha!} T(\alpha) I(\alpha) \quad (13)$$

Où les notations de multi-indices sont :

$$\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_N), \quad |\alpha| = \sum \alpha_i, \quad \alpha! = \prod \alpha_i!$$

Nous définissons :

$$T(\alpha) = \prod_i (T_{j_i}^{q_i})^{\alpha_i} \quad (14)$$

La plus grande difficulté réside maintenant dans le calcul de l'intégrale sur la sphère des produits de puissances de fonctions sphériques :

$$I(\alpha) = \iint_{\sigma_1} \prod_i (Y_{j_i}^{q_i})^{\alpha_i} Y_l^{m*} d\sigma \quad (15)$$

Pour le calcul de cette intégrale $I(\alpha)$ l'idée est d'étendre la notion du symbole 3-j de Wigner. Ces calculs complexes sont détaillés dans l'annexe de [DR2] et dans [DR3].

Partie "méthode numérique"

L'approche numérique consiste en l'analyse harmonique des S^H sur une grille en utilisant ANALHS_MC successivement, puis de calculer l'intégrale :

$$\iint_{\sigma_1} S^H Y_l^{m*} d\sigma$$

Les fonctions sphériques étant orthogonales, les termes se simplifient. Et l'on obtient les coefficients du développement par sommation :

$$K_l^m = \sum_{H=0}^{l+3} K_l^m(H) \quad (16)$$

■ Calcul du champ de gravité sur une grille par intégration du polyèdre de forme

Pour réaliser ce calcul, nous nous sommes appuyés sur les travaux de Werner [DR4] dont l'idée majeure est de transformer l'intégrale sur le volume du polyèdre, en une somme d'intégrales sur les faces du polyèdre, par application du théorème de flux-divergence. En effet, en remarquant que le potentiel de gravité est la divergence d'un certain champ, nous obtenons :

$$U = \rho \iiint_V \frac{1}{r} dV = \frac{\rho}{2} \iint_S \vec{n} \cdot \vec{\tau} dS \quad (17)$$

Ce qui se réécrit pour un polyèdre :

$$U = \frac{\rho}{2} \sum_{\text{faces}} \iint_{\text{face}} \vec{n} \cdot \vec{\tau} dS \quad (18)$$

Ainsi en chaque point de l'espace où l'accélération de la gravité est calculée, un parcours de la totalité des facettes du polyèdre est réalisé pour accumuler les contributions de chacune d'elles, et par différentiations nous obtenons le gradient du potentiel, i.e. l'accélération de la gravité.



Résultats

Les calculs d'harmoniques sphériques ont été réalisés jusqu'à l'ordre 20. La grille de discrétisation pour le calcul par intégration du polyèdre était un cube de 14 km de côté avec un pas uniforme de 200 m.

■ Harmoniques Sphériques de la topographie

La comparaison visuelle de la forme avec 20 480 facettes montre visuellement une bonne convergence du moindre carré.

Malgré tout, le pôle du corps ressemble à un point selle⁶, et il est connu que les harmoniques sphériques peuvent mal converger sur les pôles. C'est d'ailleurs ce que nous observons légèrement sur la Figure 5.

Cette même analyse harmonique a été réalisée sur les autres formes de plus de 100 000 facettes qui a vu ces oscillations au niveau du pôle pour le modèle en harmoniques sphériques. Ce comportement a forcément induit une erreur sur le modèle de gravité, mais qui est resté négligeable en dehors de la sphère de Brioullin.

6 Forme d'une surface localement convexe dans une direction, et concave dans une direction orthogonal. Ce terme réfère à la forme de selle de cheval. Le terme point-col peut être utilisé et renvoie à l'image du col de montage.

■ Comparaison de la gravité en HS et celle issue du polyèdre

Les figures 6 et 7 représentent la norme de l'accélération de la gravité lorsque celle-ci est calculée à partir du développement en harmonique sphérique à l'ordre 20, et lorsqu'elle est calculée à partir de l'intégration du polyèdre. Pour la Erreur : source de la référence non trouvée la valeur a été écartée afin d'avoir la même échelle de couleur que la Erreur : source de la référence non trouvée. Ces deux figures présentent une coupe du corps selon le plan équatorial.

La divergence du modèle en harmoniques sphériques est très visible proche du corps, mais nous observons une bonne correspondance entre les deux modèles lorsque l'on s'en éloigne.

■ Résultat du choix du site de landing

Le 12 octobre 2014, comme prévu, le RLGS a annoncé le choix du site final d'atterrissage de Philae. Un concours organisé par les agences spatiales nationales a finalement permis de le nommer "Agilkia" du nom de l'île sur le Nil où le temple de Philae a été déplacé, pour le sauver de l'inondation lors de la construction du barrage d'Assouan.

Ce site représentait le meilleur compromis possible, tant d'un point de vue scientifique que technique. Il était relativement

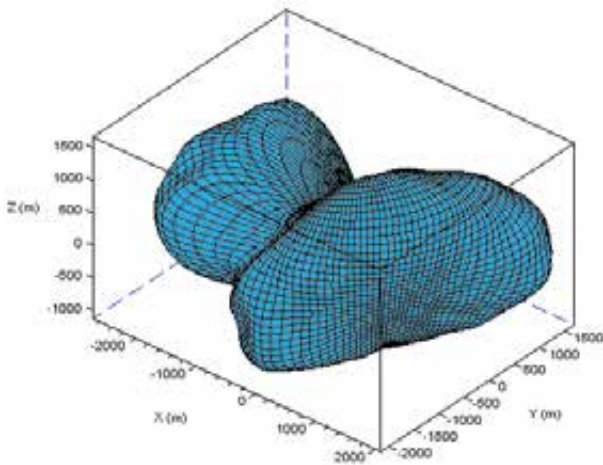


Figure 4. Représentation HS Shape #1 OSIRIS

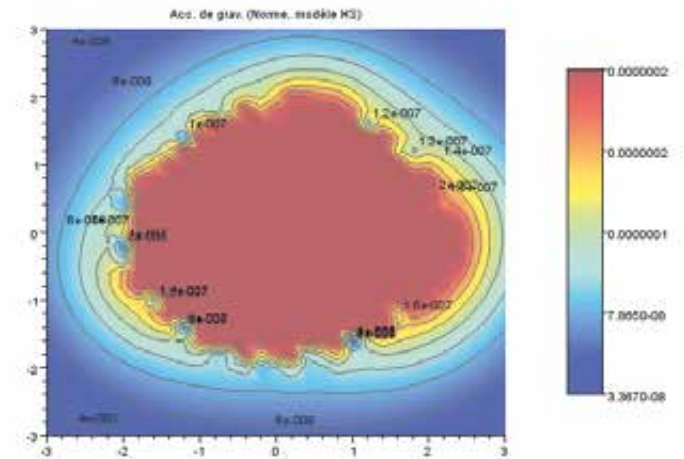


Figure 7. Norme de l'accélération de la gravité - HS

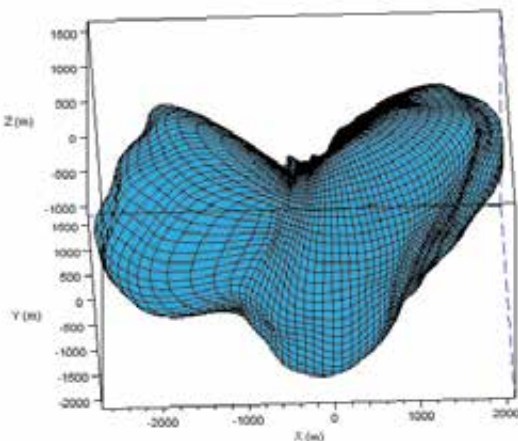


Figure 5. Vu pôle - HS Shape #1 OSIRIS

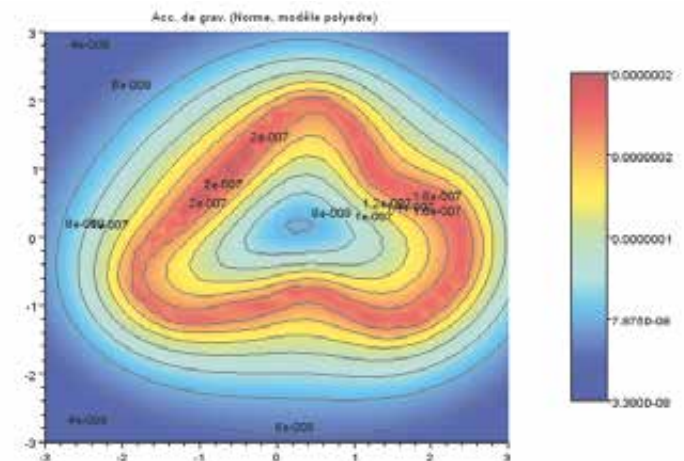


Figure 8. Norme de l'accélération de la gravité - polyèdre

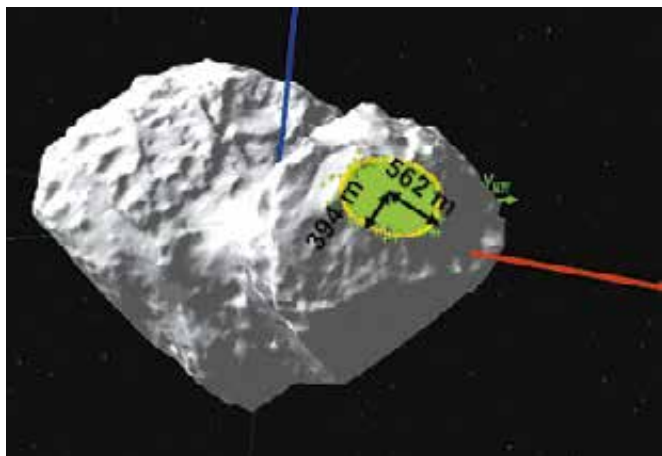


Figure 8. La zone d'atterrissage de Philae sur le site "Agilkia"

▶ plat, bien ensoleillé, avec une activité cométaire locale relativement faible. Il était dans une zone où les incertitudes liées à des erreurs de modélisation (forme et gravité en particulier) avaient peu d'impact sur la trajectoire. Enfin, il permettait à tous les instruments scientifiques de réaliser leurs mesures. La séparation de Philae était prévue le 12 novembre à 08 h 35 UTC, avec une descente de 7 heures vers le site "Agilkia".

Conclusion

Le 12 novembre à 08 h 35, la séparation de Philae a été réalisée de façon absolument parfaite par Rosetta. Ces conditions optimales ont permis un premier contact avec la surface à 15 h 34 m 04 s, seulement 50 secondes avant la date prévue, et à environ 120 m du point visé. On peut noter que cela démontrait ainsi que la modélisation de la comète (forme, rotation, gravité, dégazage) était extraordinairement bonne, étant donné le planning très contraint du processus de sélection du site. Malheureusement, en raison de la double panne du système d'ancrage et de la tuyère qui devait plaquer Philae au sol après le contact, notre atterrisseur a rebondi quatre fois à la surface avant de venir s'arrêter dans une zone faiblement éclairée, à plus d'un kilomètre du site initial. Des images OSIRIS sur lesquelles on voit le Lander en vol après le premier rebond, ainsi que des données des instruments scientifiques de Philae ont permis de tenter de reconstruire la trajectoire de rebond de l'atterrisseur.

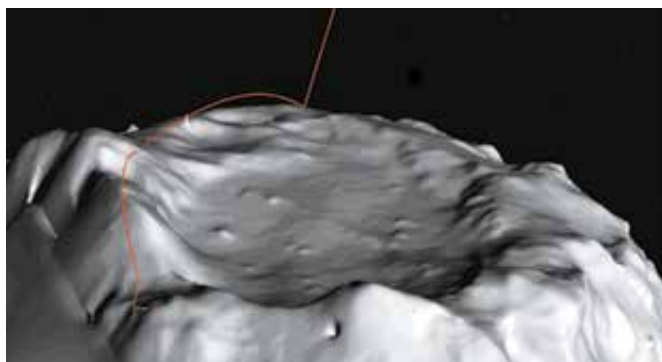


Figure 9. Trajectoire de rebond possible de Philae

Ce faible éclairage n'a pas permis aux panneaux solaires de Philae de se recharger, et après avoir épuisé sa pile, l'atterrisseur s'est donc mis en hibernation. Néanmoins, tous les instruments ont pu fonctionner pendant les 57 heures de sa mission principale, et les données scientifiques sont actuellement en cours d'étude. De plus, dans les prochains mois, la comète va se rapprocher considérablement du Soleil, le périhélie étant en août 2015. La puissance reçue du Soleil va donc fortement augmenter. D'autre part, le site final est dans l'hémisphère Sud, qui était en hiver au moment de l'atterrissage. Grâce à l'effet de saisons, l'élévation du Soleil va elle aussi considérablement augmenter sur ce site dans les mois qui viennent, et l'ensoleillement sera fortement amélioré. Il est prévu de tenter de contacter Philae dans les prochaines semaines, puis d'essayer de faire de nouvelles observations qui seraient particulièrement intéressantes, la comète devenant active en se rapprochant du Soleil. ●

Contacts

Julien LAURENT-VARIN

Spécialiste Géodésie Spatiale - CNES
julien.laurent-varin@cnes.fr

Eric JURADO

Spécialiste Système Mécanique Spatiale - CNES
eric.jurado@cnes.fr

Référence

1. Eric JURADO & al., *Philae landing site selection and descent trajectory design*, AAS 15-296 (à paraître)
2. Georges BALMINO, *Gravitational potential harmonics from the shape of an homogeneous body*, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* 60:331-364, 1994
3. Georges BALMINO, *On the product of Legendre functions as encountered in geodynamics*, *Studia geoph. Et geod.* 22:107-118, 1978
4. Robert A. WERNER, *The gravitational potential of a homogeneous polyhedron or don't cut corners*, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 59:253-278, 1994
5. Site internet ROSETTA (<http://www.rosetta-cnes.fr/rosetta/>)
6. A.Blazquez, R.Garnier, E.Jurado, *Descent Trajectories on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko using complex nucleus shape models*, RSO-TNO-LTAN-1869-CNES

ABSTRACT

Rosetta mission was, and is, an historical success for European space activities. In order to achieve this success, one essential step was required: build gravity field of the body. This prerequisite for trajectory computation, allowed to implement landing site selection process for Philae.

This paper describe this selection process together with computation methods applied for gravity field built of Churyumov-Gerasimenko 67P comet.