

SUJET DÉTAILLÉ DE LA THÈSE

Étude comparative de la source sismique des impacts de météorites à la surface de différents corps, aspect multi-physique associé à la présence d'une atmosphère et d'une couche de régolithe d'après l'étude sismique de Mars.

Marouchka Froment - élève en 4ème année à l'ENS Paris-Saclay.

Résumé du sujet de thèse

Depuis son invention au XIX^e siècle, la sismologie a été la source de la plupart de nos connaissances modernes sur la structure interne de la Terre. Aujourd'hui, les progrès de l'exploration spatiales nous permettent d'envisager d'étudier de manière similaire des objets voisins dans notre système solaire. Jusqu'en 1977, la Lune abrita ainsi un réseau de 3 sismomètres et d'un gravimètre. Depuis le 26 Novembre 2018, c'est au tour de Mars d'accueillir SEIS (Seismic Experiment for Interior Structure) [6, 7, 3], premier sismomètre déposé à sa surface par l'atterrisseur InSight.

Le but de cet instrument est d'utiliser les mesures sismiques martiennes pour dessiner une première carte en trois dimensions de la structure de la planète rouge. Pour y parvenir, malgré l'absence d'un réseau sismique dense et de forte activité tectonique sur Mars, la mission doit pouvoir tirer profit du plus grand nombre de sources sismiques possible. Une source potentielle de signal revêt ainsi un intérêt particulier : les impacts de météorites. Les estimations antérieures à la mission faisaient état d'une dizaine d'impacts détectables chaque année par SEIS [5, 2]. Ceux-ci ont l'avantage de pouvoir être localisés par imagerie satellite, comme sur la figure 1, fournissant une mesure précise de

l'épicentre de la source, ce qui est une donnée précieuse pour déterminer différentes caractéristiques (vitesse des ondes sismiques, densité, atténuation) du sous-sol martien.

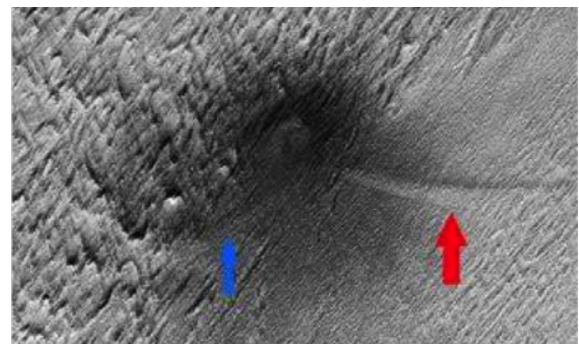


FIGURE 1 – Image MRO-HiRISE d'un cratère récent et de l'empreinte (flèches rouges et bleues) laissée dans la poussière par l'onde de choc atmosphérique ("blast") associée. Propriété de NASA/HiRISE

Cette thèse a pour but de développer une approche comparée de la source sismique et des signaux générés par des météorites, s'étendant à plusieurs corps tels que la Lune, Mars ou des astéroïdes de petites tailles, et prenant en compte les variations d'atmosphères, de gravités, et des caractéristiques physiques des surfaces des objets telluriques du système solaire. Dans le cas des asté-

roïdes, il s'agira d'estimer le transfert de moment cinétique et la dynamique des éjecta, qui sont des paramètres cruciaux pour toute future mission de déviation d'astéroïde, et en premier lieu pour la mission DART, qui impactera l'astéroïde Didymos en 2022 [1].

Elle s'inscrit dans la continuité d'un stage de M2 et d'une ARPE réalisés entre l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) et le Los Alamos National Laboratory (LANL) aux Etats-Unis. Ces laboratoires sont tous deux grandement impliqués dans l'exploration de Mars. L'IPGP a participé à la conception du sismomètre SEIS et se situe à la pointe de la sismologie et des sciences de la Terre françaises depuis près d'un siècle. LANL est acteur de plusieurs missions d'exploration martiennes, concevant par exemple l'instrument ChemCam du rover Curiosity et SuperCam du futur Mars2020. Le laboratoire possède en outre une expertise dans de nombreux domaines des géosciences et des sciences des matériaux ainsi qu'une capacité unique dans la conception et l'utilisation d'outils de modélisation numérique multiphysique de pointe pour la sismologie et la mécanique.

Cette thèse se déroulera en collaboration entre les deux laboratoires, afin d'associer leurs ressources respectives dans l'étude des phénomènes physiques extrêmes que sont les impacts. Le développement d'un modèle de source sismique des impacts de météorites s'appuiera sur les données sismiques et/ou satellites disponibles sur la Lune et sur Mars avec InSight et les astéroïdes Bénou et Didymos. En particulier, les données sismiques et atmosphériques d'InSight, ainsi que les observations des cratères d'impacts réalisées par HiRISE [8], un des orbiteurs martien de la NASA, permettront de déterminer l'effet qu'ont les interactions de la couche de régolithe martienne avec sa faible atmosphère sur un signal sismique ou acoustique de surface, ainsi que l'importance et la forme de l'onde de choc atmosphérique.

Contexte sociétal, économique et/ou industriel

L'étude des impacts de météorites sur différents corps revêt des enjeux sociétaux et industriels multiples. Tout d'abord, elle contribue à l'exploration d'une planète voisine de la Terre, ayant abrité hypothétiquement la vie il y a plusieurs milliards d'années, et candidate à une fu-

ture visite humaine. Ce projet supporte ainsi les efforts mondiaux aujourd'hui dirigés vers ce but par la NASA, l'ESA et les agences spatiales internationales. En participant à l'analyse des données sismiques de l'instrument SEIS, cette thèse poursuit la démarche pionnière de la recherche française pour le développement de la planétologie et de l'exploration spatiale.

De plus, cette étude comparée permettra une meilleure compréhension du phénomène d'impact en lui-même, et pourra venir enrichir et compléter la recherche en protection planétaire. Une meilleure détection sismique d'impacts peut en effet permettre dans le futur de redéfinir les fréquences de collision de météores avec les objets du système solaire et ainsi d'améliorer les prédictions de risques collisionnels pour la Terre. Par ailleurs, comprendre les impacts sur des petits corps permettra d'évaluer certaines techniques de protections envisageant de dévier les petits bolides de leur trajectoire à l'aide d'un impact artificiel ou d'une explosion.

Contexte Scientifique

La planétologie est une science très jeune. Elle est apparue au cours du siècle dernier grâce aux nouvelles capacités d'observation et de mesure qu'ont offert les progrès de l'exploration spatiale. Les planètes de notre système solaire, dont l'étude se bornait autrefois à de simples mesures d'orbites, de masses et de tailles, sont aujourd'hui des destinations accessibles pour des satellites, des sondes et parfois même des atterrisseurs. Ces nouvelles fenêtres d'observations ouvrent la voie vers des études comparatives des planètes telluriques de notre système avec la Terre. La planète rouge suscite par exemple de nombreux questionnements. Abritant autrefois de l'eau liquide, Mars est désormais une planète aride, à l'atmosphère et aux champs magnétiques ténus, à la merci des vents solaires. Sa surface ne montre en outre que très peu de traces d'une activité tectonique.

On soupçonne aujourd'hui sa plus faible taille, d'environ la moitié du rayon de la Terre, d'être à l'origine de ces différences majeures entre les deux planètes. C'est en effet la dynamique des noyaux et des manteaux planétaires qui régissent l'apparition d'une dynamo magnétique et de mouvements tectoniques. L'explication de cette différence d'évolution se cache donc dans ses profondeurs.

Percer les mystères souterrains de Mars est l'un

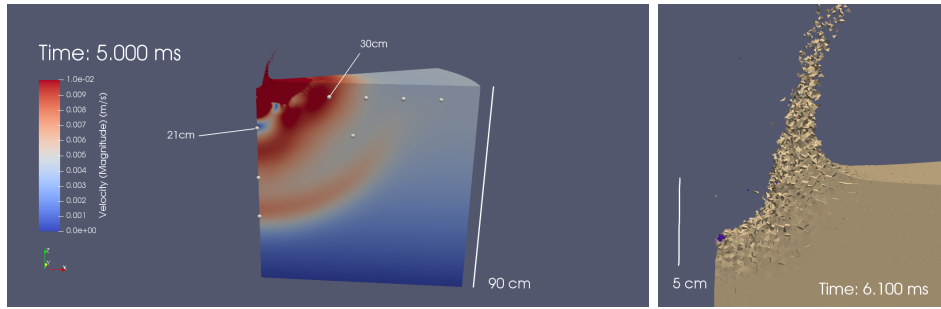


FIGURE 2 – Aperçu d’une simulation d’impact dans un milieu granulaire poreux avec HOSS. À gauche : vue sur 30° de l’onde de vitesse se propageant dans une cuve de 90cm de diamètre. À droite : vue rapprochée de l’impacteur (en violet) et de la cible (en beige) lors de la formation du cratère.

des objectifs de la mission InSight, à l’aide d’un d’une sonde de température (l’instrument HP3), d’une station météorologique et d’un sismomètre large bande (SEIS). La sismologie terrestre bénéficie actuellement de plusieurs décennies de découvertes et de théories. La plupart des sources naturelles de tremblements de terre (tectonique, volcanisme, subduction) sont connues et analysées en permanence par un réseau de plusieurs milliers de capteurs. En connaissant le signal théorique d’une source sismique et en déterminant sa position au sein du réseau, il est possible de remonter aux caractéristiques du milieu (densité, vitesses des ondes de pression et de cisaillement) parcouru par l’onde. En revanche, une unique station est à l’écoute de Mars. Pour déterminer avec fiabilité les propriétés des matériaux en profondeur, il est donc nécessaire d’avoir le plus d’information possible sur les sources de signal. Plusieurs impacts ont déjà été observés sismiquement sur la Lune (Figure 3), et sur Terre principalement via des couplages accousto-sismiques. Sur Mars, des images d’impact récents sont obtenues chaque année (voir figure 1). On sait donc qu’ils sont une source non-négligeable de signal sismique sur ces objets.

Si les données sur les cratères d’impacts sont nombreuses, il n’en est pas de même des processus dynamiques lors de l’impact. Ces dernières sont limitées à des expériences réalisées sur Terre ou aux collectes de données d’impacts terrestres (dans l’atmosphère) ou d’impacts lunaires (avec les données des missions Apollo).

La voie la plus simple pour une expérimentation à l’échelle et dans des conditions diverses est donc la simulation numérique, à confronter aux données sismiques et d’imagerie. De nombreuses modèles fournissent ainsi des simulations de la formation de cratères d’impacts, mais peu sont en-

core capables de représenter la complexité des sols géologiques [4, 10, 11]. En particulier, les sol martiens, lunaires et certains astéroïdes sont en majeure partie composé de régolithe, un matériau non consolidé, qu’un modèle numérique doit pouvoir reproduire correctement. De même, l’effet de l’atmosphère n’a encore jamais été pris en compte et est laissé de côté dans les prédictions de détectabilités d’impacts par InSight. L’effet de l’atmosphère sur la source sismique d’un impact (spectre, magnitude) et sur sa propagation est méconnu et pourrait être important.

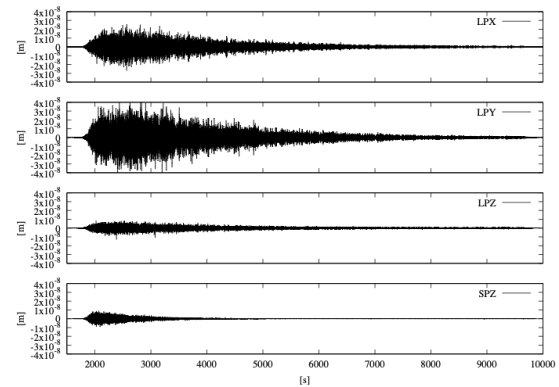


FIGURE 3 – Long period and short period seismograms generated by an impact on the Moon. (From T. Kawamura, 2019)

Démarche

La thèse débutera par un travail de définition de la source sismique d’un impact. Il s’agira d’être en mesure de déduire une magnitude et un tenseur de moment associé à la source, par analogie avec la sismologie classique. Ce travail est d’une importance primordiale pour pouvoir passer d’une étude des impacts à l’échelle de la source vers l’échelle de

la propagation régionale.

Cette information sur la source sera déterminé par la simulation numérique à l'aide de logiciels de propagation d'ondes de chocs, et d'ondes élastiques. Le logiciel de propagation basé sur les éléments spectraux SPECFEM3D et le logiciel de simulation de chocs HOSS (Hybrid Optimization Software Suite) [9], avec lesquels j'ai pu me familiariser au cours de mon stage de M2 et de mon année ARPE, seront notamment utilisés.

Les propriétés de la source pourront ensuite être analysées dans différents milieux, de structures géologiques variables. Les effets de l'atmosphère pourront être étudiés via une approche numérique utilisant le logiciel HOSS et PCBOOM. Cette approche sera couplé à une méthode empi-

rique, qui analysera les images des blasts créés à la surface Martienne par les impacts, et étudiera le couplage de l'atmosphère avec le sol dans l'environnement d'InSight à l'aide de son capteur de pression, de vent et son capteur sismique.

Enfin, nous étudierons les effets de la gravité et l'impact de cette dernière sur la génération des ejectas, en prenant pour cela 3 configurations différentes : la Lune, Mars et l'astéroïde Dydimos. Une attention particulière sera portée sur la porosité et la rigidité de la surface subissant l'impact et sur le bilan de transfert de quantité de mouvement.

Cette thèse permettra donc de approché comparée des impacts, avec les données les plus récentes de l'exploration planétaire.

Actions prévues pour la première année

Les actions de la première année consisteront en une redéfinition de la source sismique d'un impact, ainsi qu'à l'étude de cette source pour différentes échelles de gravité. Elle s'accompagneront d'une prise en main des données sismiques de la mission InSight et de premières déductions sur leurs implications pour les caractéristiques de la proche surface martienne (diffusion, dispersion, gradient de vitesses élastiques, anélasticité, anisotropie...).

Actions prévues pour la deuxième année

La théorie du couplage des ondes élastiques et acoustiques sera abordée afin de construire un modèle d'impacts couplé atmosphère/sol. Ce modèle sera complété par une étude du signal produit dans différents matériaux cibles, en fonction de leur rigidité ou de leur porosité. Les résultats pourront être mis en perspective par exemple sous forme de lois d'échelles (entre la gravité, l'élasticité de la cible, la taille de l'impacteur, la densité de l'atmosphère...) ; et leurs implications pour InSight et des missions futures pourront être établies.

Références

- [1] A. F. Cheng, J. Atchison, B. Kantsiper, A. S. Rivkin, A. Stickle, C. Reed, A. Galvez, I. Carnelli, P. Michel, and S. Ulahec. Asteroid impact and deflection assessment mission. *Acta Astronautica*, 115 :262–269, 2015.
- [2] I. Daubar, P. Lognonné, N. A. Teanby, K. Miljkovic, J. Stevanović, J. Vaubaillon, B. Kenda, T. Kawamura, J. Clinton, A. Lucas, M. Drilleau, C. Yana, G. S. Collins, D. Banfield, M. Golombek, S. Kedar, N. Schmerr, R. Garcia, S. Rodriguez, T. Gudkova, S. May, M. Banks, J. Maki, E. Sansom, F. Karakostas, M. Panning, N. Fuji, J. Wookey, M. van Driel, M. Lemmon, V. Ansan, M. Böse, S. Stähler, H. Kanamori, J. Richardson, S. Smrekar, and B. W. Banerdt. Impact-seismic investigations of the InSight mission. *Space Science Reviews*, 214(8) :132, 2018.
- [3] D. Giardini, P. Lognonné, W. B. Banerdt, W. T. Pike, U. Christensen, S. Ceylan, J. F. Clinton, M. van Driel, S. C. Stähler, M. Böse, R. F. Garcia, A. Khan, M. Panning, C. Perrin, D. Banfield, E. Beucler, C. Charalambous, F. Euchner, A. Horleston, A. Jacob, T. Kawamura, S. Kedar, G. Mainsant, J.-R. Scholz, S. E. Smrekar, A. Spiga, C. Agard, D. Antonangeli, S. Barkaoui, E. Barrett, P. Combes, V. Conejero, I. Daubar, M. Drilleau, C. Ferrier, T. Gabsi, T. Gudkova, K. Hurst, F. Karakostas, S. King, M. Knapmeyer, B. Knapmeyer-Endrun, R. Llorca-Cejudo,

- A. Lucas, L. Luno, L. Margerin, J. B. McClean, D. Mimoun, N. Murdoch, F. Nimmo, M. Nonon, C. Pardo, A. Rivoldini, J. A. R. Manfredi, H. Samuel, M. Schimmel, A. E. Stott, E. Stutzmann, N. Teanby, T. Warren, R. C. Weber, M. Wiczorek, and C. Yana. The seismicity of Mars. *Nature Geoscience*, in press 2020. doi : <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0539-8>.
- [4] N. Gldemeister and K. Wünnemann. Quantitative analysis of impact-induced seismic signals by numerical modeling. *Icarus*, 296 :15 – 27, 2017.
- [5] P. Lognonné and C. L. Johnson. Planetary seismology. *Treatise on Geophysics*, 10 :69–122, 2007.
- [6] P. Lognonné, W. B. Banerdt, D. Giardini, W. T. Pike, U. Christensen, P. Laudet, S. de Raucourt, P. Zweifel, S. Calcutt, M. Bierwirth, K. J. Hurst, F. Ijpelaan, J. W. Umland, R. Llorca-Cejudo, S. A. Larson, R. F. Garcia, S. Kedar, B. Knapmeyer-Endrun, D. Mimoun, A. Mocquet, M. P. Panning, R. C. Weber, A. Sylvestre-Baron, G. Pont, N. Verdier, L. Kerjean, L. J. Facto, V. Gharakanian, J. E. Feldman, T. L. Hoffman, D. B. Klein, K. Klein, N. P. Onufer, J. Paredes-Garcia, M. P. Petkov, J. R. Willis, S. E. Smrekar, M. Drilleau, T. Gabsi, T. Nebut, O. Robert, S. Tillier, C. Moreau, M. Parise, G. Aveni, S. B. Charef, Y. Bennour, T. Camus, P. A. Dandonneau, C. Desfoux, B. Lecomte, O. Pot, P. Revuz, D. Mance, J. tenPierick, N. E. Bowles, C. Charalambous, A. K. Delahunty, J. Hurley, R. Irshad, H. Liu, A. G. Mukherjee, I. M. Standley, A. E. Stott, J. Temple, T. Warren, M. Eberhardt, A. Kramer, W. Khne, E.-P. Miettinen, M. Monecke, C. Aicardi, M. Andr, J. Baroukh, A. Borrien, A. Bouisset, P. Boutte, K. Brethom, C. Brysbaert, T. Carlier, M. Deleuze, J. M. Desmarres, D. Dilhan, C. Doucet, D. Faye, N. Faye-Refalo, R. Gonzalez, C. Imbert, C. Larigauderie, E. Locatelli, L. Luno, J.-R. Meyer, F. Mialhe, J. M. Mouret, M. Nonon, Y. Pahn, A. Paillet, P. Pasquier, G. Perez, R. Perez, L. Perrin, B. Pouilloux, A. Rosak, I. S. de Larclause, J. Sicre, M. Sodki, N. Toulemont, B. Vella, C. Yana, F. Alibay, O. M. Avalos, M. A. Balzer, P. Bhandari, E. Blanco, B. D. Bone, J. C. Bousman, P. Bruneau, F. J. Calef, R. J. Calvet, S. A. D’Agostino, G. de los Santos, R. G. Deen, R. W. Denise, J. Ervin, N. W. Ferraro, H. E. Gengl, F. Grinblat, D. Hernandez, M. Hetzel, M. E. Johnson, L. Khachikyan, J. Y. Lin, S. M. Madzunkov, S. L. Marshall, I. G. Mikellides, E. A. Miller, W. Raff, J. E. Singer, C. M. Sunday, J. F. Villalvazo, M. C. Wallace, D. Banfield, J. A. Rodriguez-Manfredi, C. T. Russell, A. Trebi-Ollenmu, J. N. Maki, E. Beucler, M. Böse, C. Bonjour, J. L. Berenguer, S. Ceylan, J. Clinton, V. Conejero, I. Daubar, V. Dehant, P. Delage, F. Euchner, I. Estve, L. Fayon, L. Ferraioli, C. L. Johnson, J. Gagnepain-Beyneix, M. Golombek, A. Khan, T. Kawamura, B. Kenda, P. Labrot, N. Murdoch, C. Pardo, C. Perrin, L. Pou, A. Sauron, D. Savoie, S. Stähler, E. Stutzmann, N. A. Teanby, J. Tromp, M. van Driel, M. Wiczorek, R. Widmer-Schmidrig, and J. Wookey. SEIS : Insight’s Seismic Experiment for Internal Structure of Mars. *Space Science Reviews*, 215(1) :12, 2019.
- [7] P. Lognonné, W. Banerdt, W. Pike, D. Giardini, U. Christensen, R. Garcia, T. Kawamura, S. Kedar, B. Knapmeyer-Endrun, L. Margerin, F. Nimmo, M. Panning, B. Tauzin, J.-R. Scholz, D. Antonangeli, S. Barkaoui, E. Beucler, F. Bissig, N. Brinkman, M. Calvet, S. Ceylan, C. Charalambous, P. Davis, M. van Driel, M. Drilleau, L. Fayon, R. Joshi, B. Kenda, A. Khan, M. Knapmeyer, V. Lekic, J. McClean, D. Mimoun, N. Murdoch, L. Pan, C. Perrin, B. Pinot, L. Pou, S. Menina, S. Rodriguez, C. Schmelzbach, N. Schmerr, D. Sollberger, A. Spiga, S. Sthler, A. Stott, E. Stutzmann, S. Tharimena, R. Widmer-Schmidrig, F. Andersson, V. Ansan, C. Beghein, M. Bse, E. Bozdog, J. Clinton, I. Daubar, P. Delage, N. Fuji, M. Golombek, M. Grott, A. Horleston, K. Hurst, J. Irving, A. Jacob, J. Knollenberg, S. Krasner, C. Krause, R. Lorenz, C. Michaut, B. Myhill, T. Nissen-Meyer, J. ten Pierick, A.-C. Plesa, C. Quantin-Nataf, J. R. L. Rochas, M. Schimmel, S. S. T. Spohn, N. Teanby, J. Tromp, J. Vallade, N. Verdier, C. Vrettos, R. Weber, D. Banfield, E. Barrett, M. Bierwirth, S. Calcutt, N. Compaire, C. Johnson, D. Mance, F. Euchner, L. Kerjean, G. Mainsant, A. Mocquet, J. A. R. Manfredi, G. Pont, P. Laudet, T. Nebut, S. de Raucourt, O. Robert, C. Russell, A. Sylvestre-Baron, S. Tillier, T. Warren, M. Wiczorek, C. Yana, and P. Zweifel. Constraints on the shallow elastic and anelastic structure of Mars from InSight seismic data. *Nature geoscience*, in press 2020. doi : <http://doi.org/10.1038/s41561-020-0536-y>.

- [8] A. S. McEwen, E. M. Eliason, J. W. Bergstrom, N. T. Bridges, C. J. Hansen, W. A. Delamere, J. A. Grant, V. C. Gulick, K. E. Herkenhoff, L. Keszthelyi, R. L. Kirk, M. T. Mellon, S. W. Squyres, N. Thomas, and C. M. Weitz. Mars reconnaissance orbiter’s high resolution imaging science experiment (hirise). *Journal of Geophysical Research : Planets*, 112(E5), 2007. doi : 10.1029/2005JE002605.
- [9] A. Munjiza, E. E. Knight, and E. Rougier. *Large Strain Finite Element Method : A Practical Course*. John Wiley & Sons, 2014.
- [10] E. Pierazzo, N. Artemieva, E. Asphaug, E. C. Baldwin, J. Cazamias, R. Coker, G. S. Collins, D. A. Crawford, T. Davison, D. Elbeshausen, K. A. Holsapple, K. R. Housen, D. G. Korycansky, and K. Wünnemann. Validation of numerical codes for impact and explosion cratering : Impacts on strengthless and metal targets. *Meteoritics & Planetary Science*, 43(12) :1917–1938, 2008.
- [11] K. Wünnemann, G. Collins, and H. Melosh. A strain-based porosity model for use in hydrocode simulations of impacts and implications for transient crater growth in porous targets. *Icarus*, 180 (2) :514–527, 2006.