



ÉDITO : LA LUNE ET MARS

Les éclipses de lune, contrairement aux éclipses de soleil, ne sont pas des phénomènes rarissimes. Pourtant, celle du 27 juillet 2018 est tout-à-fait exceptionnelle. En effet cette éclipse, la plus longue du 21^{ème} siècle, se produit le jour où la Planète rouge non seulement passe en opposition quasi périhélique, brillant d'un feu éclatant, mais se trouve de plus en conjonction avec notre satellite (à environ 12 diamètres lunaires).

Intrigués et subjugués par la présence de ce phare céleste inattendu, les curieux qui pourront observer la pleine Lune plongée dans la pénombre de la Terre garderont le souvenir d'un spectacle fascinant (malheureusement visible en partie seulement en France métropolitaine...). Pour certains, ce pourrait être leur découverte de la planète !

Pour nous, alors que les perspectives lunaires et martiennes se chevauchent dans les projets astronautiques, cet événement porte une double charge symbolique. La conjonction des deux astres nous incite à penser qu'en fin de compte ce sont des objectifs connexes, tandis que le contraste des diamètres apparents semble marquer la perspective de la route à suivre. Mais, en même temps, le spectacle de ce fanal éblouissant, éclipsant une Lune majestueuse mais éteinte, devrait renforcer l'attrait que nous éprouvons pour ce monde lointain. Comme si celui-ci nous envoyait un signal, un appel à l'atteindre enfin, au bout d'une attente de plusieurs milliards d'années.

Un programme « Lune, puis Mars » peut constituer une option pragmatique acceptable s'il est véritablement bâti pour permettre à la phase lunaire de préparer le voyage vers Mars. En réalité, le choix programmatique des objectifs n'est pas le problème majeur. Le drame, c'est l'absence de programme et de ressources budgétaires adéquates. Il y a bien eu dans le passé deux tentatives de « retour à la Lune, puis Mars » : la SEI en 1989 et Constellation en 2004, mais toutes deux ont avorté ! Et la troisième initiative annoncée récemment par le président des États-Unis ne paraît pas plus robuste : rien n'est voté, le lanceur lourd accumule les retards, les avancées de SpaceX obscurcissent les plans de la NASA, l'Europe n'a ni lanceur, ni vaisseau qualifiés vol humain, ni les ressources de ses ambitions. La politique d'exploration spatiale risque donc de poursuivre ses errements, l'espoir étant que les ambitions de SpaceX se concrétisent suffisamment pour redonner de réelles perspectives, probablement au travers d'un partenariat public-privé.

Richard Heidmann
vice-président

Dans ce numéro :

- La NASA veut faire voler un hélicoptère sur Mars p.1
 - Descente et atterrissage de la BFR sur Mars p.3
 - La vie de l'association p.4
 - EMC18 dans la capitale horlogère de la Suisse p.5
 - Ballades sur un monde cratérisé. Mars ? Non, la Terre p.5
- prochain numéro : octobre 2018...

LA NASA VEUT FAIRE VOLER UN HÉLICOPTÈRE SUR MARS

Le nouvel administrateur de la NASA, Jim Bridenstine, l'a décidé, la mission « Mars-2020 », qui quittera la Terre en juillet 2020, emportera un mini-hélicoptère avec elle. Cela ouvre des perspectives très intéressantes.

Une difficulté majeure que les missions martiennes en surface doivent affronter est le caractère souvent extrêmement agressif du sol pour les roues puisqu'il n'y a évidemment pas de route et que par ailleurs l'érosion a été faible donc que les roches sont coupantes. On le voit bien sur les photos que Curiosity prend périodiquement de son train de roues, qui nous inquiètent car on y voit depuis longtemps des déchirures sur la bande de roulement en aluminium, alors qu'elles étaient prévues pour parcourir un terrain difficile pendant aussi longtemps que durerait l'approvisionnement en énergie de l'appareil. La conséquence est que l'on doit ménager ces roues au détriment de la visite de sites qu'on voudrait examiner de plus près. Que de fois le rover est-il passé hors d'atteinte de reliefs dont on ne pouvait que rêver de s'approcher ou près desquels on était passé et qu'on regrettait de ne pas avoir étudiés (par exemple les supposés tapis microbiens fossiles que la paléo-biogéologue Nora Noffke a cru voir sur le site Gillespie Lake Member fin 2014) ! Par ailleurs, la visibilité est limitée. On se demande toujours ce qu'il peut y avoir « derrière » ou « plus loin ». Enfin certains endroits peuvent être dangereux et contraindre à des détours. Rappelons-nous que Spirit s'est ensablé, que sa mission s'est de ce fait terminée prématurément et que les pentes fortes sont intéressantes à explorer (examen de leurs strates) mais qu'au-delà d'un certain degré de déclivité on ne peut s'y risquer.



Le mini-hélicoptère de Mars-2020 est représenté ici posé sur le sol martien, après un vol. Son panneau solaire recharge sa batterie.

(doc. NASA/JPL)

Il y a donc un besoin, celui de s'élever au-dessus du sol pour voir un peu plus loin ou pour aller « quelque part » et y aller vite (car le temps est toujours compté puisqu'on souhaite faire le maximum d'observations dans le cadre d'une mission et que le rover peut subir une défaillance fatale à tout moment). Pour cela deux solutions, le plus lourd ou le plus léger que l'air. Dans les deux cas, le problème est la faible densité de l'atmosphère, en ordre de grandeur environ 100 fois moins élevée que sur Terre ; c'est très peu pour la portance ou la traînée (lift and drag) d'un objet volant. Compte tenu de la composition de l'atmosphère (CO₂), meilleure de ce point de vue que notre mélange oxygène et azote, ces facteurs donnent, pour les pressions de 600 à 1100 Pascal, l'équivalent des conditions que l'on a vers 30 à 35 km d'altitude au-dessus du niveau de la mer. A ces altitudes, la stabilité est précaire et des phénomènes chaotiques possibles (nombre de Reynolds élevé). Et plus on s'élève plus cette instabilité s'aggrave. Nous ne discuterons pas ici des avantages ou des inconvénients du plus léger que l'air puisque le sujet est l'hélicoptère. Disons seulement en ce qui concerne le premier, qu'il présente l'avantage d'être peu consommateur d'énergie une fois gonflé (principalement pour la propulsion) et qu'il pourrait donc mener des missions longues. Ses inconvénients sont (1) le poids de l'enveloppe et de la structure, accessoirement du gaz - hydrogène de préférence puisque le plus léger - et (2) le volume important nécessaire pour obtenir la portance requise dans cet air peu dense, et en conséquence la prise au vent.



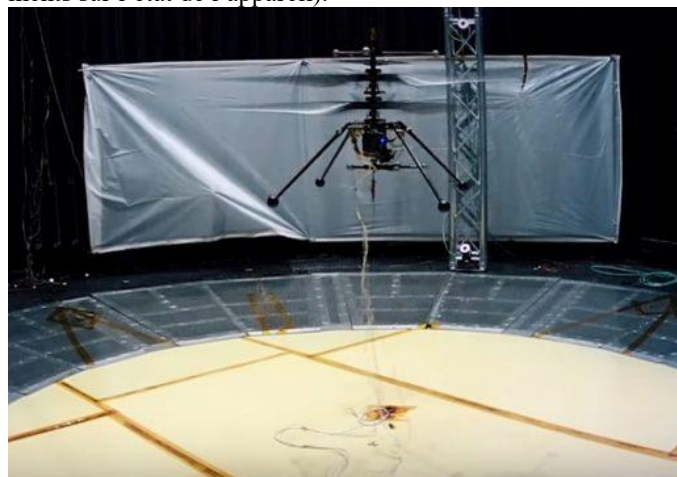
Matt Golombek, responsable du projet au JPL, montre ici la maquette à échelle 1 du drone. (doc. NASA/JPL)

Ce premier hélicoptère de la NASA (« Mars Helicopter Scout ») est naturellement conçu d'abord comme un essai ou une démonstration de faisabilité en situation réelle, plus que comme un des instruments d'observation de la sonde. L'étude a commencé en 2013, avec GeorgiaTech, une des meilleures écoles d'ingénieurs des Etats-Unis, et le résultat que l'on voit sur la vidéo de la NASA est impressionnant car celle-ci montre qu'il a bel et bien volé de façon satisfaisante dans une atmosphère raréfiée équivalente à l'atmosphère martienne (composition et densité). Les raisons du succès sont sans doute (1) la giration en sens contraire des deux rotors coaxiaux (configuration éliminant le besoin d'un « rotor de queue »), et (2) le fait que la rotation se fait à très grande vitesse (3000 tours par minute, soit 10 fois la vitesse de rotation des rotors d'hélicoptère traditionnels). La configuration assure la stabilité directionnelle (un hélicoptère « classique » se met à tourner sur lui-même si son rotor de queue est défaillant) car la rotation en sens contraire des deux rotors assure un couple en lacet nul. La grande vitesse de rotation permet de générer un flux d'air vers le bas suffisamment rapide

pour créer par réaction, malgré la faible densité de l'atmosphère, la sustentation requise pour soulever la masse de l'appareil soumise à la gravité martienne.

Bien sûr la masse de l'hélicoptère est faible (1,8 kg) et l'énergie embarquée étant limitée (batterie Lithium-ion rechargée par panneau solaire sur le corps de l'hélicoptère), l'appareil ne pourra faire que de petits vols (maximum prévu de 2 à 3 minutes, par jour) d'autant que la vitesse de rotation rapide des pales est très consommatrice. Ces petits vols lui permettront cependant de parcourir jusqu'à 600 mètres en distance et de monter jusqu'à 40 mètres du sol mais l'appareil pourra aussi faire du vol stationnaire, et cela est très important pour l'observation. Notons la taille impressionnante de ces pales : 120 centimètres (pour un corps cubique de 14 cm de côté) ! On imagine difficilement de plus gros hélicoptères martiens avec ces proportions mais ce n'est pas nécessaire si l'appareil doit simplement reconnaître le terrain sur la trajectoire d'un rover ou s'il doit prendre des photos ou analyser la composition par spectrométrie d'une roche inaccessible au rover.

Entre les vols, l'hélicoptère n'aura plus de connexion fixe au rover et communiquera avec lui par radio (envoi de l'ordre de mission, retour d'images ou de données observées et renseignements sur l'état de l'appareil).



Le prototype en essais en chambre reproduisant les conditions atmosphériques martiennes. (doc. DR)

Espérons que cette démonstration technologique soit un succès. Cela accroîtrait significativement les capacités d'exploration robotique. Mais attention ! Sans homme en prise directe avec l'appareil (impossible compte tenu du « time-lag » entre Mars et la Terre), tout doit être programmé. L'appareil ne pourra donc servir que pour les repérages, puis ensuite pour les observations à distance, mais pas pour les collectes d'échantillons, qui supposeraient toutes sortes de capteurs et une autonomie de décision qui sont probablement encore difficiles à mettre au point (identification de l'objet « intéressant », descente jusqu'au sol ou en sustentation immobile à proximité, prélèvement), sans compter la masse supplémentaire que ces moyens entraîneraient.

Pierre Brisson

Sources :

NASA : note de presse 18-035 du 11 mai 2018

<http://premium.lefigaro.fr/sciences/2018/02/23/01008-20180223ART-FIG00156-la-nasa-reve-d-envoyer-un-petit-helicoptere-sur-mars-en-2020.php> (le Figaro)

DESCENTE ET ATTERRISSAGE DE LA BFR SUR MARS

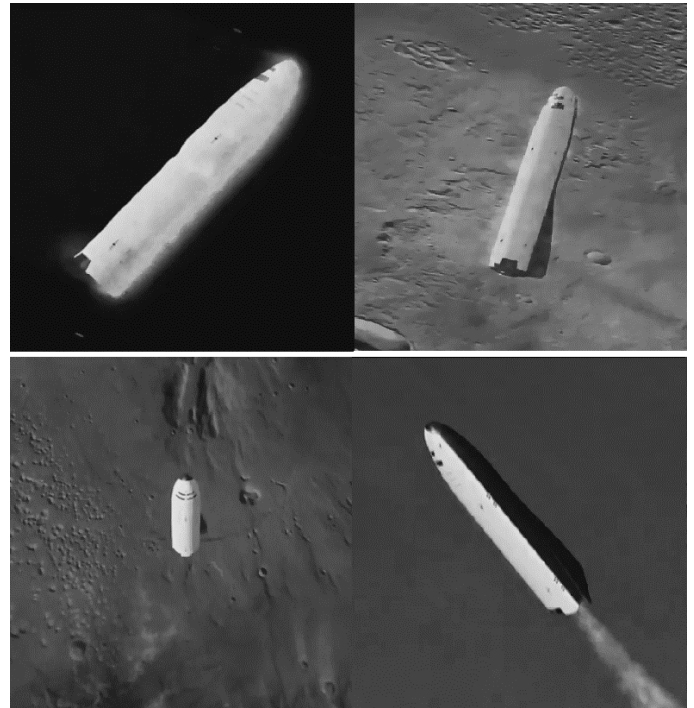
La future navette géante de Space X doit théoriquement atterrir sur Mars en effectuant une série de manœuvres complexes. Cela commence en orbite martienne par une petite poussée qui conduit la BFR à descendre à grande vitesse, de l'ordre de 5 à 6 km/s, en suivant une trajectoire courbe vers la surface martienne. Afin de préparer la rentrée atmosphérique, comme le faisait la navette spatiale, la première manœuvre consiste à positionner la BFR de telle sorte que sa surface inférieure reçoive l'impact de la résistance de l'air. Il faut pour cela actionner des moteurs d'appoint.

Ensuite, lorsque les frictions avec l'air ont commencé, il faut préserver cette attitude pendant environ 3 minutes. C'est une phase critique, car c'est à ce moment que la BFR reçoit un flux de chaleur très important et que le freinage est le plus fort. La vitesse doit en effet décroître de 5 km/s à environ 1 km/s. La stabilisation du vaisseau est délicate. Les petits ailerons placés tout en bas apportent une certaine stabilité, mais la répartition des masses n'est pas homogène. Il faudra donc un contrôle par les moteurs de contrôle d'attitude auxiliaires, à moins de jouer sur la portance des ailerons, s'ils sont orientables. Les risques associés à cette phase sont importants : si l'angle d'attaque ou l'attitude du vaisseau est mal calculé, si le contrôle exercé grâce aux moteurs auxiliaires est défaillant, si les protections thermiques ne sont pas suffisantes ou sont endommagées, ou encore si la structure est fragilisée et susceptible de se disloquer au pic de freinage, la BFR risque la destruction totale avec perte de la totalité de l'équipage.

Mais la descente n'est pas terminée. Lorsque la vitesse de la BFR est suffisamment réduite, de l'ordre de 1 km/s, les frictions avec l'air ne constituent plus un danger aussi important. Cependant, on est alors à altitude relativement basse et les moteurs principaux ne sont pas orientés dans la direction de chute, ils sont même pratiquement orientés à 90° de la direction requise. Il faut donc basculer rapidement pour placer les moteurs dans la bonne direction. Théoriquement, les moteurs étant plus lourds, la réorientation dans la direction de la vitesse est quasi-automatique, mais il faut qu'elle ait lieu au bon moment, pas trop tôt, et surtout il faut éviter un phénomène de balancier ou de vrille. Une petite aide des moteurs auxiliaires pour orienter idéalement le vaisseau est la bienvenue. Le danger de cette phase est également important. Il faut à tout prix faire basculer la fusée dans la bonne direction avant de démarrer le freinage terminal, et il faut le faire rapidement, parce que la fusée est en chute libre ! Ensuite, il faut actionner les moteurs principaux (Raptors) pour finir de freiner jusqu'au sol martien, avec un contrôle très précis de la vitesse et de l'orientation, car il faut arriver au sol avec une vitesse terminale quasi-nulle et une orientation parfaitement verticale. Space X a démontré ses compétences dans ce domaine avec l'atterrissage sur barge, mais il faut malgré tout atteindre un taux de fiabilité suffisant pour le vol habité et dans le contexte de Mars, ce qui reste à faire.

Ajoutons à cela qu'il faut un contrôle rigoureux de la trajectoire de descente, car l'objectif est d'atterrir à un endroit très précis, typiquement proche de la base. Cette contrainte a un impact à plusieurs niveaux. D'abord, dans la première phase de freinage, il faut contrôler finement la portance pour ajuster en temps réel

la trajectoire de descente. Cela permet de réduire les incertitudes sur la zone d'atterrissage à deux ou trois kilomètres. Ensuite, lors de la dernière phase propulsive, il faut procéder à un ajustement latéral en fonction des besoins. Rien d'impossible, mais les difficultés sont nombreuses.



En haut à gauche, entrée dans l'atmosphère martienne, début du freinage hypersonique. En haut à droite, fin du freinage hypersonique. En bas à gauche, la BFR s'aligne sur sa vitesse. En bas à droite, la BFR a démarré le dernier freinage, propulsif. (doc. Hazegrayart)

Pour faire descendre la BFR vers Mars de façon sûre, Space X va donc devoir relever de nombreux challenges. Ce qui est étonnant, c'est qu'ils aient pris le contre-pied des spécialistes du domaine. En effet, il est généralement préconisé de réduire la taille des atterrisseurs et de choisir autant que possible une forme classique de type capsule Apollo. Trois arguments plaident en faveur de cette stratégie : le premier est qu'à densité égale, les petits vaisseaux ont un coefficient balistique plus faible. Cet argument ne tient pas dans le cas présent car on exploite une grande partie de la surface du vaisseau pour la traînée et la densité de la BFR à vide est faible, ce qui réduit le coefficient balistique. Le deuxième argument est que la forme conique ou biconique du bouclier d'une capsule et le placement de la charge utile derrière simplifient grandement le contrôle d'attitude, qui est essentiellement mécanique. Il y a ainsi peu de risque d'une erreur sur l'angle d'attaque, d'un renversement ou d'une dislocation de ce type de vaisseau en comparaison des risques associés à la descente de la BFR. Le troisième argument est que le moteur est placé derrière le bouclier thermique, de sorte qu'il n'y a pas besoin de réorienter le vaisseau comme cela est illustré sur la figure, il suffit de dégager le bouclier et on peut démarrer la phase propulsive juste après.

La stratégie de Space X pour l'atterrissage sur Mars n'est donc pas la moins risquée. Cependant, avec un vaisseau aussi grand, y avait-il une autre option ? Sans doute que non. Néanmoins, l'hypothèse même de descendre la BFR sur Mars mérite d'être étudiée de plus près. En effet, Un tout autre concept consisterait

à laisser la BFR en orbite et à exploiter des petits atterrisseurs martiens, qui multiplieraient les allers-retours vers l'orbite, soit pour descendre ou monter les passagers, soit pour réapprovisionner la BFR. L'avantage des petits vaisseaux est multiple. Ils offrent notamment la possibilité d'utiliser un bouclier de taille ajustable, d'exploiter de grands parachutes en cas de problème moteur, et surtout, on peut leur adjoindre des systèmes de secours pour sauver la vie des astronautes si la descente se passe mal.

Un dernier point mérite d'être abordé, c'est celui de la qualification des systèmes d'atterrissage. Dans le cadre très réglementé actuel, il semble très difficile de démontrer la fiabilité et la sécurité d'un atterrissage avec la BFR. Il faudrait sans doute procéder à de multiples essais à vide (sans passagers) en environnement martien et les réussir tous pour obtenir la qualification. Etant donné que les conditions de descente et d'atterrissage sont relativement fluctuantes (densité de l'air qui dépend du climat martien, variabilité de la vitesse et de l'angle de rentrée atmosphérique, etc.), il est probable qu'il faille au moins 3 ou 4 tests concluants avant de pouvoir envisager d'envoyer des humains. Ces tests risquent d'être extrêmement coûteux, avec des risques très élevés de dépassement des coûts et des retards de programmation en cas d'échec d'un seul atterrissage. Mais ils seront utilisés pour prépositionner un maximum d'équipements et de matériaux avant l'arrivée des premiers pionniers. Quoi qu'il adienne, le concept de BFR a au moins un mérite indéniable, celui d'inciter les ingénieurs à reconsidérer les architectures de mission et à revoir les idées préconçues.

Jean-Marc Salotti

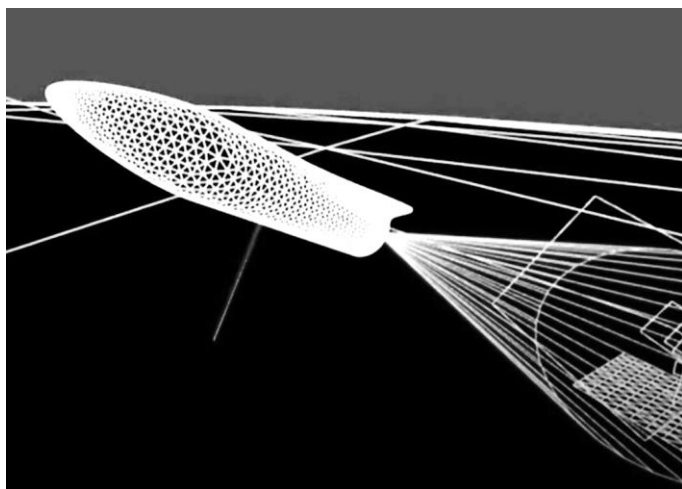


Image de la simulation de la phase de freinage et descente, présentée par Elon Musk à l'IAC d'Adélaïde en 2017.

LA VIE DE L'ASSOCIATION

Suite aux travaux préparatoires menés par **Julien Villa-Massone** et **Aline Decadi** et au sondage effectué auprès des membres, nous avons sélectionné notre nouveau logo, que vous avez certainement remarqué à sa place, en page de garde de notre bulletin. Le premier souci était d'en simplifier le dessin, afin de pouvoir le diffuser plus facilement sur des supports

variés. Nous avons cherché à y mettre en avant les deux thèmes centraux de notre passion : la planète et l'arrivée de l'Homme. La réunion du Conseil d'Administration du 26 avril a permis de constituer le bureau du nouveau conseil issu de l'AGO du 10 mars. **Philippe Clermont**, déjà nommé président lors du précédent conseil du 18 janvier, suite à la disparition d'**Alain Souchier**, a été confirmé à ce poste. Nous le remercions pour son engagement. Sa connaissance des milieux de haute technologie et les contacts qu'il a eus dans le milieu spatial lorsqu'il était en charge du suivi du CNES à la Direction Générale de l'Armement seront précieux.

Le conseil s'est à nouveau réuni le 20 mai, en particulier pour une mise à jour de notre organisation et de la définition des fonctions, rendue nécessaire par le changement de président, mais aussi par l'arrivée récente d'Aline Decadi. Le détail en apparaîtra dans le compte-rendu de la réunion, et dans la mise à jour de nos statuts.

En matière de communication, nous avons été sollicités à plusieurs reprises, en particulier à l'occasion du départ d'Insight (France Culture), mais aussi par des producteurs de télévision préparant de futures émissions sur l'aventure martienne.

A l'initiative de la société DEVOXX, **Richard Heidmann** a eu l'opportunité de prononcer une conférence au Palais des Congrès de la porte Maillot devant un millier de développeurs informatiques réunis en salon professionnel... et de dédicacer les 80 « Embarquement pour Mars » offerts par les organisateurs.



Les « Embarquement pour Mars » partent comme des petits pains.
(doc. C. Sabourdin)

Autre intervention marquante de Planète Mars : cette année l'Institut des Hautes Études pour la Science et la Technologie (IHEST) clôturait son cycle national de formation en demandant à des personnalités extérieures de commenter les différents rapports d'étude émis par les participants. L'un de ceux-ci avait pour thème : « Conquérir les planètes, habiter l'espace » et nous avons eu l'honneur d'être sollicités. **Philippe Clermont** et **Richard Heidmann** ont répondu à cette invitation, ce dernier intervenant aux côtés de Roland Lehoucq, astrophysicien renommé, auteur et vulgarisateur célèbre.

En matière de projets étudiants, le niveau des prestations de cette année s'avère excellent, comme en attestent les nominations des

projets que nous avons tutorés dans deux concours internationaux :

-Mention particulièrement chaleureuse pour le projet d'atterrisseur cargo présenté au concours « Red Eagle » de la Mars Society par une équipe d'étudiants IPSA emmenée par notre collègue **Maxime Lenormand**. Ce projet est d'ores et déjà sélectionné pour la finale, les prix devant être attribués fin Août, lors de la Convention annuelle de la Mars Society. Tous nos vœux ! Et félicitations pour la qualité de l'étude, menée en trois mois seulement et à titre d'initiative personnelle.



-Une équipe de l'École Polytechnique, qui envisageait d'approfondir le projet de ballon touristique martien étudié l'an dernier, s'est finalement consacrée au thème innovant de l'apport d'un ballon associé à un rover pour l'exploration robotique. Ce travail a été très apprécié par le jury de l'X, qui l'a nommé pour le concours interne des meilleurs projets de l'école.

-Une autre équipe de l'X s'est consacrée à un thème au moins aussi innovant, la conception d'un « exosquelette » destiné à profiter de la gravité martienne réduite pour améliorer les performances humaines en termes de course et de saut. Ceci à des fins ludiques et d'entretien physique.

Ces deux projets X ont été présentés au concours annuel de l'organisation « Mars City Design ». Résultats imminents.

Richard Heidmann

EMC18 DANS LA CAPITALE HORLOGÈRE DE LA SUISSE

Du 26 octobre, 14h00, au 28 octobre, 12h00, la Mars Society Switzerland vous invite à venir à la Chaux-de-Fonds, participer à la 18^{ème} European Mars Convention, EMC18.

Notre hôte sera le Musée International d'Horlogerie (MIH), institution de ce pays horloger, particulièrement attentif au temps qui passe ! Nous parlerons donc du temps, des horloges atomiques et de leurs applications spatiales. Notre débat, impliquant Robert Zubrin, Claude Nicollier (l'astronaute Suisse qui a réparé Hubble et qui a tenté de dévider un long câble dans l'espace), Richard Heidmann et moi-même, sera sur le thème « Des robots et des Hommes sur Mars sous le regard du Temps ».

Bien entendu nous ne parlerons pas que du temps. Une EMC est l'occasion de faire le point sur les avancées technologiques dans

tous les domaines concernés par « l'accession de l'homme sur Mars », notre objectif, et aussi sur la connaissance de cette planète si importante pour nous permettre de mieux nous comprendre nous-mêmes. Vous aurez notamment l'occasion d'écouter et de poser des questions à Philippe Lognonné, responsable scientifique (« PI ») du sismomètre SEIS embarqué sur InSIGHT ou à Michel Cabane, co-PI du laboratoire SAM embarqué à bord de Curiosity. Le programme est encore évolutif et vous serez informés progressivement de nos progrès mais déjà je peux vous dire qu'il sera passionnant. Venez nombreux. Inscrivez-vous !

www.planete-mars-suisse.space/fr/emc18

Pierre Brisson



BALLADES SUR UN MONDE CRATÉRISÉ. MARS ? NON LA TERRE

Beaucoup de mondes à surface solide dans le système solaire sont marqués de cratères météoritiques. Certains mondes à surface active, souvent remodelée, Vénus, Io, la Terre sont moins marqués. On a longtemps cru que la Terre ne présentait qu'exceptionnellement la trace de tels impacts car ils ne pouvaient être encore visibles que s'ils avaient eu lieu récemment, à l'échelle des temps géologiques. Or dans la deuxième moitié du vingtième siècle les identifications de cratères ou vestiges de cratères se sont multipliées.

Ces quelques lignes visent à présenter au lecteur certains des cratères de notre planète, présentation non exhaustive puisque le compte est aujourd'hui d'au moins 174, dont 19 en Afrique, 27 en Asie, 26 en Australie, 37 en Europe, 57 en Amérique du nord et 8 en Amérique du sud. Plus 370 structures suspectes.



Cratère à l'horizon ! Terre, Arizona. (doc. A. Souchier)



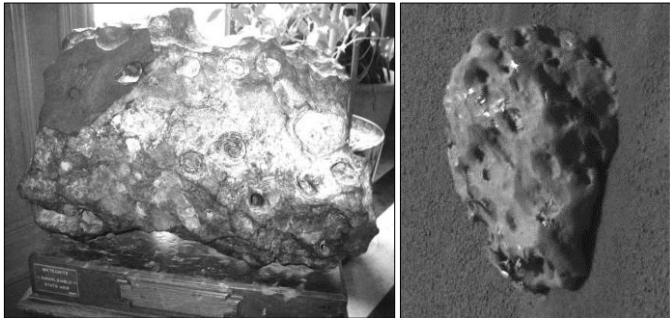
Cratère à l'horizon ! Mars, Ares Vallis. (doc. NASA)

Commençons par le mieux connu et celui dont l'identification est la plus ancienne : le Meteor Crater ou cratère Barringer. Situé en Arizona, il date de 49 000 ans seulement, d'où son état de fraîcheur, mesure 1190 m de diamètre pour 180 m de profondeur. Sa formation provient de l'impact à 14 km/s d'un bloc métallique de 25 à 50 m de diamètre d'environ 100 000 tonnes.



Le Meteor Crater ou cratère Barringer, jeune impact de 49 000 ans.
(doc. A. Souchier)

L'origine météoritique de cette structure était avancée dès la fin du 19^{ème} siècle ; elle fut défendue par Daniel Barringer qui rechercha vainement la météorite, espérant tirer un profit de l'exploitation de son énorme masse de fer. On ne savait pas, à l'époque, que l'énergie cinétique de l'impact n'autorisait pas la conservation en l'état de l'impacteur. On trouve dans la région dite de Canyon Diablo, autour du cratère, beaucoup de fragments constitués principalement de kamacite, alliage de nickel et de fer. Ce matériau était déjà utilisé par les Amérindiens avant l'arrivée des Européens.



Le plus gros morceau récupéré à Canyon Diablo a une masse de 640 kg ! Le musée de minéralogie de l'école des Mines de Paris possède (voir ci-dessus à gauche) un morceau de plus de 200 kg (doc. A. Souchier). Remarquer l'analogie d'aspect avec la météorite métallique photographiée par le rover Opportunity sur Mars le 6 janvier 2005 (à droite, doc. NASA/JPL).

Mais il n'y a pas besoin d'aller jusqu'en Arizona pour trouver les traces d'un impact météoritique. Dans le centre de la France, à Rochechouart, on a détecté les nombreuses traces d'un tel impact, mais le cratère ou ses vestiges ne sont plus visibles dans le paysage. Lorsque le cratère n'est plus reconnaissable et n'est plus qu'une « cicatrice », on parle d'un astroblème. Une dimension de 23 km est attribuée à l'astroblème de Rochechouart, qui n'a été reconnu comme tel qu'en 1969 ! Comment identifie-t-on qu'une structure circulaire visible ou détectable seulement dans des couches géologiques est bien le résultat d'un impact ? Il y a trois indices principaux : l'existence de roches fracturées en éventail, marque de la propagation de l'onde de choc au moment de l'impact (cônes de percussion ou shatter cone en anglais), la

présence de quartz microfracturés dits également quartz choqués et la présence de minéraux polymorphes formés sous très haute pression en un temps très court. L'existence de brèches, roches plus ou moins refondues, est un indice supplémentaire mais pas absolu car ces brèches peuvent aussi avoir une origine « terrienne ».

Rochechouart s'est formé il y a 214 millions d'années (+ ou - 8). John Spray, le directeur du centre de Sciences Spatiales et Planétaires de l'université du New Brunswick au Canada, a émis l'hypothèse que deux autres cratères se seraient formés au même moment par le choc avec la Terre d'un corps céleste fragmenté. Les deux autres cratères ainsi simultanément créés sont le Saint Martin et le Manicouagan, tous les deux au Canada.



Beau cône de percussion de quelques dizaines de centimètres, preuve d'un impact. Musée du cratère de Steinheim près de Munich.

(doc. A. Souchier)

Un tel retour en arrière permet de rappeler qu'il y a 214 millions d'années les continents n'avaient pas la forme d'aujourd'hui. A cette époque ils étaient regroupés et l'Atlantique ne séparait pas la France et le Canada. Et les trois impacts, y compris celui de Rochechouart, étaient localisés à la même latitude de 22,8 degrés nord donc parfaitement alignés, ce qui n'est plus le cas aujourd'hui.



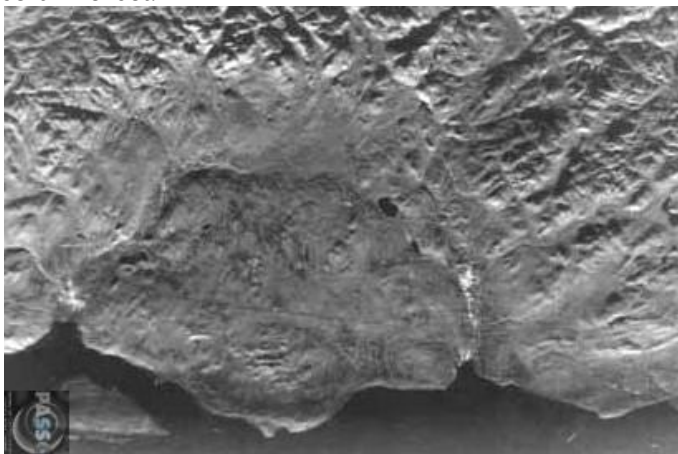
Le Manicouagan sous la station orbitale ISS. (doc. NASA)

Le Manicouagan est particulièrement spectaculaire car la réalisation de la série de barrages Manic a créé, dans la structure circulaire du cratère, un lac annulaire de 70 km de diamètre, l'ensemble atteignant 100 km de diamètre et donnant lieu à de spectaculaires photos depuis l'espace.

Le vieux bouclier granitique canadien a particulièrement bien gardé la trace des impacts passés. Rappelons que, très au nord, dans l'île Devon, l'habitat martien simulé FMARS de la Mars Society est situé sur le rempart du cratère Haughton de 23 km de diamètre créé il y a 39 millions d'années.

Sur la Lune, Copernic a les mêmes dimensions que le Manicouagan. Avec 3500 m de dénivelé entre les remparts et le fond de l'arène, Copernic donne l'impression d'un cratère récent. Il a en fait 810 millions d'années et est donc 4 fois plus vieux que le Manicouagan, démonstration éclatante des différences d'activités érosives sur Terre et sur la Lune. Sur les astres tectoniquement morts comme la Lune, les impacts météoritiques sont les seuls mécanismes de création de montagnes. Ainsi, les montagnes culminantes de la Lune, les monts Leibnitz, qui dépassent les 8000 m, sont nées de l'impact géant qui a créé le bassin Aitkin sur la face cachée. Sur Terre c'est la tectonique des plaques qui l'emporte en créant les plus hautes montagnes, suivie de peu par l'activité volcanique. Sur Mars c'est l'activité volcanique qui a généré les plus hauts sommets (Olympus Mons). Lorsque la couverture nuageuse le permet et que les commandants de bord de vols transatlantiques choisissent des routes nord, l'arrivée sur le Canada permet de voir certains de ces cratères. Il faut bien sûr avoir pris ses repères avant en consultant les bases de données existantes.

Le Canada possède un autre cratère spectaculaire, beaucoup plus accessible que le Manicouagan, le Charlevoix, région touristique à l'ouest de Québec. L'impact a eu lieu il y a 342 millions d'années (+ ou - 15) et a laissé une structure circulaire de 54 km de diamètre dont un tiers a disparu dans le Saint Laurent. Cette structure n'a été identifiée comme astroblème qu'en 1965 par Jehan Rondot.



Le cratère du Charlevoix en image radar. L'estuaire du Saint Laurent est en bas avec à gauche l'île des Coudres. Le centre du cratère est occupé par une zone plus élevée liée au rebond après l'impact.



La baie de Baie Saint Paul à marée basse, là où le plancher du Charlevoix disparaît dans le Saint Laurent, avec à gauche le coin est de la surélévation centrale. (doc. Aliaume Souchier)

Aux USA, à proximité de Cincinnati, le cratère de Serpent Mound est un exemple de cratère ancien, difficile à voir en surface, même si la photo aérienne reste assez parlante en montrant une structure de 8 km de diamètre. Cet impact date de 320 millions d'années, mais il n'a été reconnu comme tel qu'en 1998.



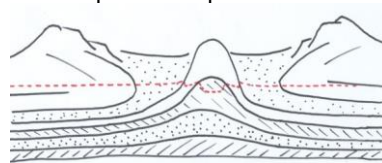
Serpent Mound dont le tour est marqué par des collines boisées. Le sud du cratère a été raboté par les glaciers descendus du nord. (DR)



A l'horizon, le rempart Nord. Plus avant, l'élévation centrale.

(doc. A. Souchier)

Serpent Mound est très érodé; c'est aussi le cas d'Upheaval Dome dans l'Utah. Bien que la structure circulaire soit très visible, le niveau du sol est aujourd'hui à plusieurs centaines de mètres sous le niveau initial après impact. Upheaval Dome mesure 10 km de diamètre et affiche 170 millions d'années. Il n'a été reconnu comme cratère par le célèbre géologue et astronome Eugen Shoemaker qu'en 1993, sur détection de cônes de percussion et quartz choqués.



L'allure actuelle d'Upheaval Dome en pelure d'oignon est due à l'intense érosion de 170 millions d'années. Le sol actuel est en rouge.

(doc. A. Souchier)



Upheaval Dome, dans l'Utah. (doc. D. Brinkman)

Mais retournons en Europe, où l'on peut voir de nombreuses traces d'impacts conservées dans les vieux sols granitiques du bouclier scandinave et qui sont aujourd'hui des lacs.

Plus près de nous, en Allemagne, deux cratères encore bien apparents méritent une visite : Ries et Steinheim près de Munich.



Le pourtour du Ries est marqué par des collines boisées. (doc. DR)



Vue au téléobjectif des collines boisées du rempart nord depuis le rempart sud ouest avec au milieu la ville de Nordlingen et son clocher bâti en brèches, roches fondues à l'impact et resolidifiées ensuite.

(doc. A. Souchier)

Les deux impacts se sont produits en même temps il y a 15,1 millions d'années (+ ou - 0,1). Il devait donc s'agir d'un petit astéroïde et de son satellite. Les deux cratères ont des dimensions très différentes : 24 km pour le Ries et 3,8 km pour Steinheim. Ce qui nous conduit à une question non encore abordée dans cet article : quelle est la taille de l'impacteur comparée à la taille du cratère ? La dimension du cratère est liée à l'énergie cinétique de l'impacteur, égale à $\frac{1}{2}$ de sa masse multipliée par le carré de sa vitesse. Venant de l'infini par rapport à la Terre, la vitesse d'arrivée est forcément supérieure à la vitesse de libération soit 11 km/s ; mais elle peut, si l'astéroïde vient des confins du système solaire, atteindre les 30 km/s ! Déjà entre ces deux chiffres, l'énergie cinétique varie dans un rapport de 1 à 9. Et la densité de l'impacteur peut aussi varier dans un rapport de 1 à 2 selon qu'il s'agit d'un corps « pierreux » ou à dominante métallique. Pour simplifier on considère que le cratère a environ 20 fois le diamètre de l'impacteur et jusqu'à 40 fois si la vitesse d'arrivée ou la densité sont élevées. Ainsi le « petit » Steinheim aurait été créé par un corps de 200 m de diamètre et le « grand » Ries par un corps de 1200 m. Ries et Steinheim n'ont été confirmés qu'en 1960, par Eugen Shoemaker !



Brèche du Ries désignée Suévite. La face taillée montre différents types de roches prises dans un milieu fondu par l'impact puis resolidifié. Les morceaux noirs sont constitués de verre naturel, résultat de la fusion de la silice. Le spécimen mesure 6 cm de large.

(doc. A. Souchier)



L'impact du Riess a projeté à plusieurs centaines de kilomètres des petits blocs de silice fondu, verre naturel. Retrouvés en Bohême et Moldavie, ils sont désignés pour cette raison « Moldavites ». Ces minéraux appartiennent à la catégorie des tectites. Ces échantillons proviennent de la région de Lhenice à 500 km du Ries. Collection du musée de minéralogie de l'école des Mines à Paris.



Les moldavites claires et de couleur verte sont utilisées en bijouterie. Des bulles de gaz sont visibles dans cet échantillon de 13 mm. Les moldavites sont retrouvées à 1000 km du Ries. (doc. A. Souchier)



Steinheim, petit cratère de 4 km, peut être perçu dans son ensemble non seulement depuis un avion mais également au sol. Comme la plupart des cratères terrestres, Steinheim a longtemps été un lac. (doc. DR)

Ainsi sans aller très loin, en France, en Allemagne, en Suède, le tourisme en Europe permet d'approcher des cratères météoriques si caractéristiques des autres mondes du système solaire. Puisque les opportunités de visite de ces mondes sont encore très limitées, il faut bien se contenter, dans un premier temps, de ces visites à parfum extraterrestre sur notre bonne vieille Terre.

Alain Souchier

(article rédigé en Juin 2010)

Ont collaboré à ce numéro : Pierre Brisson, Richard Heidmann, Jean-Marc Salotti et Alain Souchier (décédé en décembre dernier).
Achévé d'imprimer : Objectif numérique 56100-Lorient.
Dépôt légal : juillet 2018