



Numéro 86

PLANÈTE MARS



Bulletin de l'association Planète Mars, 28 rue de la Gaîté 75014-Paris

janvier 21

ISSN 1772-0370

ÉDITO : BONNE ANNÉE MARTIENNE, RICHE EN ÉVÈNEMENTS.

Il est encore temps de souhaiter à tous nos membres une très bonne année 2021, santé, bonheur, de beaux projets. Pour ce qui concerne notre thème d'intérêt commun, Mars, souhaitons spécifiquement un grand succès aux trois missions sur le point d'arriver à destination, et tout spécifiquement Perseverance, la plus ambitieuse.

Le 18 février la salle de contrôle du JPL vivra à nouveau « les sept minutes de terreur » durant lesquelles lui parviendront les informations sur le déroulement (totalement automatique) des phases successives de la descente. La plateforme devra ralentir d'environ 20.000 km/heure jusqu'à une vitesse nulle et un posé en douceur, avec précision, dans le cratère Jezero. Le fait que, compte tenu des temps de propagation radio, ces informations atteindront la Terre alors que les jeux seront déjà faits ajoutera à l'angoisse des témoins ; on ne pourra constater le résultat qu'a posteriori.

Rappelons que si la technologie est semblable à celle de Curiosity, des améliorations majeures ont été apportées sur la précision de posé, avec un guidage/recalage sur images du sol prises durant la phase terminale. La NASA nous a habitués à des succès récurrents, mais nous ne devons jamais banaliser ce qui est la démonstration d'un formidable savoir-faire technologique.

Même s'ils sont peu médiatisés en France, réjouissons-nous des progrès concrets vers les projets à moyen terme de l'Homme sur Mars. SpaceX avance la production et les essais des prototypes de son Starship à un rythme soutenu. Nous attendons incessamment l'essai du véhicule Starship n°9 (SN9), visant une montée à une dizaine de km d'altitude permettant de valider le mode de descente innovant « sky diver », suivi d'un posé de précision à proximité du pas de tir. Bien sûr, il reste des défis technologiques à surmonter (notamment la protection thermique, comme expliqué dans ce numéro), mais nous avons déjà constaté la capacité d'innovation des équipes R&D de SpaceX !

Je profite de cet éditorial pour annoncer l'organisation prochaine de « webinars » réguliers sur des thèmes d'actualité martienne, qui se tiendront sur le premier semestre 2021 et permettront à nos membres d'interagir avec le conférencier, en complément des articles de notre bulletin.

Philippe Clermont
président

Dans ce numéro :

- Starship : le défi de la protection thermique p.1
- Mars 2020 : Jezero, le cratère de toutes les espérances p.4
- La vie de l'association p.6
- La géographie de Fondation p.6

prochain numéro : avril 2021...

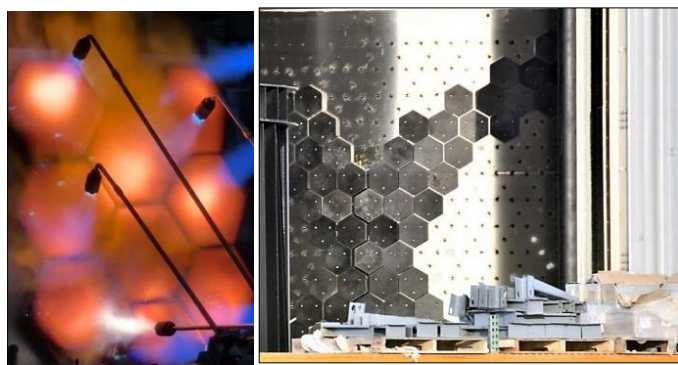
STARSHIP : LE DÉFI D'UNE PROTECTION THERMIQUE RÉUTILISABLE

Des conditions de rentrée sévères

Dans son cycle de vie, le vaisseau devra endurer 2 rentrées atmosphériques, sur Mars et sur Terre successivement. Du point de vue thermique : température maximale de la PT et charge thermique (quantité de chaleur absorbée par le vaisseau), le retour sur Terre est plus difficile que la descente sur Mars, essentiellement du fait de la grande différence de vitesse d'entrée (directe) dans l'atmosphère : 6 à 9 km/s pour Mars, environ 12 km/s pour la Terre.

Or le flux thermique maximal (en W/m^2) infligé à la peau du vaisseau est proportionnel à V^3 ! La manœuvre terrestre est de ce fait a priori au moins 2,4 fois plus exigeante en capacité de résistance de la zone exposée au flux maximal. Il faut se rappeler que la Navette Spatiale, pour laquelle ce problème avait été maîtrisé, n'avait qu'une vitesse d'à peine 7,7 km/s...

La capacité à faire rentrer des vaisseaux interplanétaires aux environs de 12 km/s a certes été démontrée, mais au prix de PT consommables, or l'ambition du projet Starship est de fonctionner avec une PT réutilisable !



Essai aux chalumeaux Montage sur la coque ; à noter : les têtes des plots de fixation par tuile. (doc. NASASpaceflight)

Ce point, sur lequel SpaceX travaille visiblement depuis longtemps, comme le montrent les photos récentes de tuiles montées sur les coques des prototypes, est indéniablement un des plus critiques du projet. Il n'est pas démontré, en particulier, que SpaceX parvienne à développer un matériau de PT capable de supporter le niveau de température maximale induit par l'importance du flux de convection produit par l'air circulant entre la peau de l'engin et l'onde de choc. Peut-être faudra-t-il consentir à une PT supportant sans dégradation la phase martienne mais nécessitant une réhabilitation à l'issue de la phase terrestre ? Ou peut-on espérer un nouvel éclat d'innovation de la part des ingénieurs de SpaceX ? A noter que le cycle de vie du Starship sera de 52 mois, du fait qu'il retournera sur Terre trop tard pour assurer la mission suivant la sienne, et qu'on

disposera ainsi de près de 2 années pour les opérations de maintenance, dont l'éventuelle remise en état de la PT ne serait probablement pas la plus lourde.

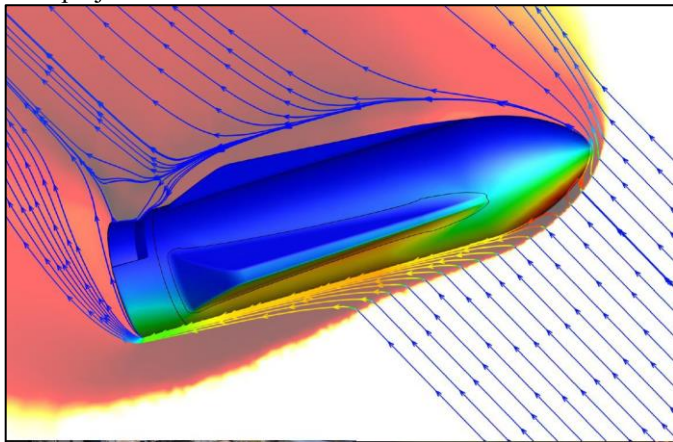
Aperçu du problème physique

La majeure partie de la rentrée, et en particulier la phase où les effets thermiques sont dimensionnants pour la PT (flux maximal) ont lieu en régime hypersonique, pour lequel il existe une théorie analytique (loi de Sutton et Graves, appliquée par Ernest V. Zoby, 1968), simple dans sa formulation, mais difficile à mettre en application pour un corps portant. En effet elle ne s'applique bien en principe qu'au cas d'une capsule sphéro-conique (type Apollo ou Dragon).

De plus, le Starship adopterait dans une première phase une incidence voisine de 90°, tant que le facteur de charge du freinage ne dépassera pas la limite tolérée (3,5 g ?) ; ceci afin de présenter un coefficient de traînée maximal ; selon l'étude ONERA citée, celui-ci monterait à 11, contre 0,2 à 0° d'incidence (pour une surface de référence égale à la section du fuselage). Dans une deuxième phase il réduirait son incidence, jusqu'à une quarantaine de degrés, afin de créer une portance lui permettant d'allonger la durée de sa descente aérodynamique et de terminer celle-ci à un couple de valeurs altitude-vitesse permettant de préparer et d'effectuer la phase de descente en mode « skydive » précédant la rétropropulsion finale.

Grâce au logiciel AReS (de notre collègue **Jérôme Daniel**), les étudiants ont été à même de calculer des trajectoires de descente, en utilisant les valeurs de coefficients de traînée et de portance calculés par l'ONERA.

Faute de mieux, la théorie du corps sphéro-conique a été retenue. Et, en l'absence d'une justification suffisante, les étudiants ont préféré conserver la valeur réelle (estimée) du rayon du nez, 0,65m, alors que le cône portant rentrant en forte incidence présente plutôt une surface de rayon 4,5m. C'est décisif, car la théorie indique que le flux maximal est proportionnel à l'inverse de la racine carrée de ce paramètre. Des outils de simulation numérique existent. Malheureusement, les acteurs de cette étude appartenaient à une filière n'y accédant pas. Un thème pour un futur projet de fin d'études ?



Exemple de calcul aérodynamique réalisable avec des logiciels d'un coût et d'une complexité accessibles aux écoles et universités.

La phénoménologie globale peut être abordée simplement :

- en traversant l'onde de choc, l'air se charge d'une énergie considérable, se traduisant par une température très élevée (milliers de degrés) et la formation d'un plasma ;

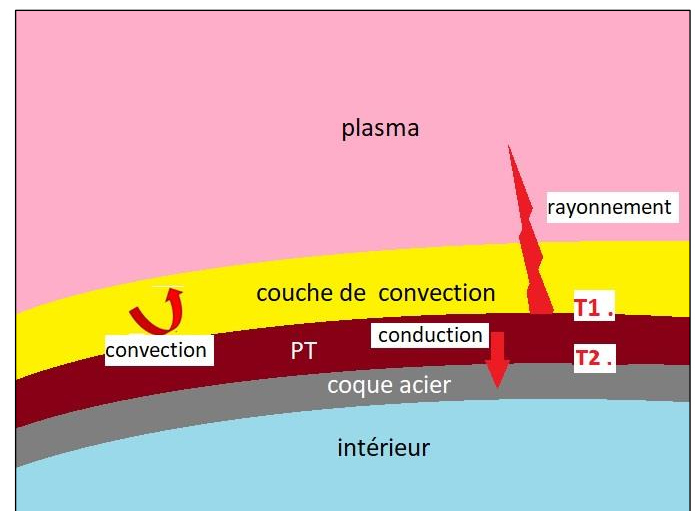
- exposée à cet air hyper chaud, la PT en reçoit de l'énergie au travers de deux processus : un flux de rayonnement et un flux de convection, ce dernier d'autant moins important que la température de la peau de la PT est élevée ; le flux de rayonnement peut être négligé par rapport au flux de convection ;

- la PT transmet de l'énergie, à l'extérieur par rayonnement, et à l'intérieur, vers la coque en acier, par conduction.

L'air chaud du plasma émet aussi de l'énergie par rayonnement, mais en quantité négligeable comparativement aux autres flux (quelques kW/m²) ; ceci simplifie l'analyse. Ce qui est recherché, ce sont les caractéristiques requises pour la PT (conductivité thermique, température maximale admissible et épaisseur) pour :

- maintenir la température de la coque acier en-dessous de sa valeur limite (800°C) ;

- s'assurer que la charge thermique accumulée par le vaisseau dans sa rentrée reste gérable.



Démarche calculatoire

Pour déterminer les conditions les plus sévères et les valeurs de vitesse V et d'altitude z correspondantes :

>1/ On calcule une trajectoire de rentrée et, à chaque pas de calcul,

>2/ on évalue le flux de convection (au point d'arrêt) à l'aide de la formule de Sutton et Graves :

$$F_{\text{Convection}} = K (\rho/R_N)^{1/2} V^3$$

où : ρ : masse volumique de l'air

R_N : rayon du « nez »

V : vitesse

K : constante sensée rendre compte des conditions de la convection, calculable en fonction de la composition de l'atmosphère et des énergies (enthalpies) présentes dans la couche de convection et à la paroi de la PT. ρ et V sont données par le programme AReS, qui inclut ce calcul de convection et permet donc de déterminer l'instant de flux maximal.

>3/ Lorsque celui-ci est atteint, on détermine T_1 , la température de surface de la PT, en écrivant que les flux d'énergie entrants et sortants de la PT sont équilibrés :

$$F_{\text{Convection}} = F_{\text{Rayonnement}} + F_{\text{Conduction}}$$

Cette relation peut dans la pratique être simplifiée, car le flux de conduction est faible, comparativement au flux de convection ; on peut donc en fait écrire :

F Convection = F Rayonnement

avec :

F Rayonnement = $\epsilon_{PT} \sigma T_1^4$

où : ϵ_{PT} : émissivité du matériau de la PT

σ : constante de Stefan-Boltzmann

T_1 : température de surface de la PT ;

relation dont on tire T_1 en chaque point de la trajectoire et donc le point de **température de surface PT maximum** atteint au cours de la rentrée.

>4/ L'évaluation du flux total auquel est soumis le véhicule, et de la **charge thermique** (quantité de chaleur) accumulée au cours de la rentrée est difficile, car le flux de convection calculé est celui au point d'arrêt de l'écoulement ; le flux en un point quelconque de la PT est différent (et moindre). Le programme de simulation AReS applique la théorie de Lees, conçue malheureusement, elle aussi, pour des capsules de forme sphéro-conique. Son application à un corps portant, retenue faute de mieux, est critiquable, spécialement à forte incidence. La conductibilité thermique de l'acier étant relativement élevée (15 W/K/m), la diffusion des calories provenant de la PT y sera rapide et la coque tout entière fera office de capacité thermique. Avec ces hypothèses on obtient une formulation permettant théoriquement de contraindre les caractéristiques de la PT, en écrivant que l'intégrale sur la durée de la rentrée du flux total moyen provenant de la PT est inférieure à la capacité thermique de la masse d'acier M_{acier} (les contributions de rayonnement, qui sont en T^4 , donc comparativement faibles par rapport au régime de température de la PT, peuvent être négligées).

Le **flux de conduction** provenant de la PT s'exprime par :

F Conduction = $\lambda (T_1 - T_2) S_{éch} / e$

où : λ : conductivité du matériau de la PT (0,25 à 0,1 W/m/K)

e : épaisseur de la PT

$S_{éch}$: surface d'échange, = 1 ici car calcul en W/m²

et la **capacité thermique** C_c de la coque d'acier par :

$C_c = C_{Pacier} \cdot M_{acier}$

où : C_{Pacier} : capacité calorifique de l'acier (500 J/kg/K)

M_{acier} : masse des éléments en acier thermiquement affectés (~50000 kg).

On obtient ici **$C_c = 25000$ kJ**

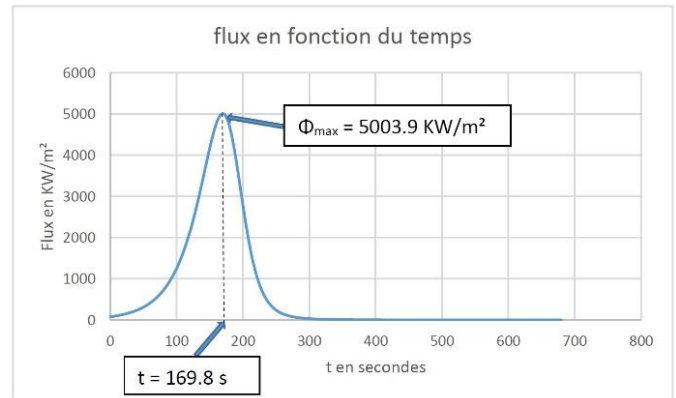
Il est possible d'évaluer un flux max moyen pendant la rentrée (au point d'arrêt) puisque le flux max est calculé tout au long de la trajectoire (formule de Sutton et Graves). L'estimation du flux total, comme on vient de le voir, doit être considérée avec réserve.

Scénario traité par les étudiants

Les étudiants de l'ESTACA ont fait figurer dans leur rapport les résultats pour une trajectoire représentative, en se fixant un angle d'attaque de 45° ; le programme AReS ne prend malheureusement pas en charge une incidence variable, d'où ce choix d'une valeur moyenne. Les coefficients de traînée et de portance sont extraits du rapport ONERA : $C_D = 5$, $C_L = 4.2$. La masse du vaisseau à sa rentrée sur Terre a été prise égale à 130 tonnes. Conditions de rentrée :

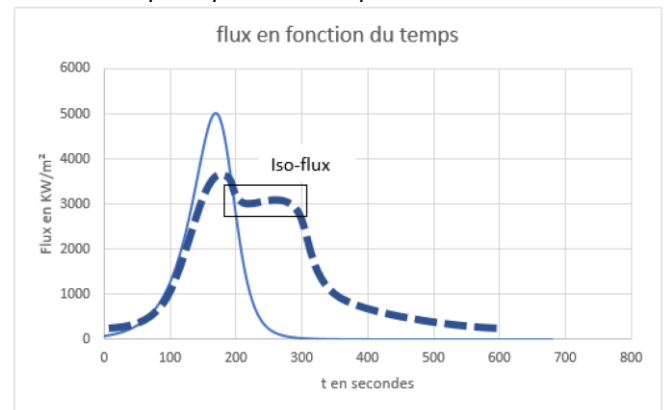
Ventrée = 11 466 m/s

Pente : 2°, une pente faible réduisant le flux max et le facteur de charge max.



Les auteurs de l'étude concluent : « Le flux maximal ainsi calculé (au point d'arrêt) est très élevé, de l'ordre de 5MW/m² contre 1MW/m² pour la plupart des démonstrateurs hypersoniques. On peut mettre en cause, bien évidemment, la formulation que nous avons utilisée ici, et prendre du recul face à ces résultats qui sont plus proches de ce que l'on peut attendre de la rentrée atmosphérique d'un corps balistique tel qu'une météorite ou une ogive.

Dans la réalité, la rentrée atmosphérique d'un corps portant se sépare en plusieurs phases, dont deux prépondérantes : une phase dite iso-flux, durant laquelle le flux est constant, ainsi qu'une autre phase dite iso-traînée, qui correspond à une décélération constante induite par une valeur de traînée constante. En pratique un guidage aérodynamique (modification de la portance, traînée, pente et incidence) permet d'arriver à un résultat plus satisfaisant d'un point de vue trajectoire. Voici une courbe qui représente qualitativement un scénario plus réaliste pour la rentrée atmosphérique du Starship. »



Notons par ailleurs que si nous donnons à R_N , le rayon du « nez » introduit dans la théorie de Sutton, une valeur plus proche du rayon du fuselage, le flux maximal est réduit d'un facteur $(0,65/R_N)^{1/2}$. Ainsi, pour la valeur du rayon du fuselage, ce facteur est de 0,38, et le flux max calculé tombe à la valeur plus réaliste de **1,9 MW/m²** dans le cas de la trajectoire initialement considérée, et à **1,4 MW/m²** dans celle plus optimale que l'on vient de citer. A cette valeur corrigée correspond encore, malgré tout, une température au point d'arrêt très élevée, que les matériaux non ablatifs les plus résistants, tel que le RCC (Reinforced Carbon Composite), utilisé pour le nez et les bords d'attaque du Space Shuttle, ne supportent pas : **2250 K** pour une limite de moins de 1800 K !

Comment les ingénieurs de SpaceX comptent-ils surmonter cet obstacle ? Peu d'informations filtrent à ce sujet. Elon Musk avait un moment laissé entendre qu'ils s'orientaient vers une technologie de transpiration, où un fluide de refroidissement est injecté dans la couche limite par une multitude de micro trous. Mais cette voie semble abandonnée, peut-être pour des raisons de fiabilité (risque d'obstruction des injecteurs). Cela étant, plusieurs indices montrent que la firme s'est attelée à ce problème dès le début : vidéos d'essai au chalumeau ; prototypes actuels du vaisseau souvent garnis de zones couvertes de tuiles hexagonales, dont quelques photos permettent d'estimer l'épaisseur (3 cm), ainsi que d'autres zones garnies de plots de fixation des tuiles sur la coque. SpaceX a par ailleurs annoncé qu'ils utiliseraient un matériau nouveau, développé en interne...

SpaceX va-t-elle une fois de plus tirer de sa manche une innovation miracle, au niveau du matériau ou du système (comme la transpiration) ? Ou va-t-elle en fin de compte déroger à son impératif de totale réutilisabilité, en admettant de disposer sur les zones les plus chaudes (nez, bords d'attaque) une couche supplémentaire de PT en matériau ablatif ; une telle décision serait en réalité acceptable, dans la mesure où les vaisseaux revenant de Mars ne peuvent y repartir qu'après près de deux ans d'attente (pour la prochaine fenêtre de lancement) ; l'opération de restauration de la PT ne serait donc absolument pas sur le chemin critique du cycle opérationnel. A noter que pour les vols de point à point sur Terre, ou vers l'orbite basse terrestre, cette PT supplémentaire n'aurait pas lieu d'être installée. Les vols de ravitaillement des vaisseaux en partance interplanétaire pourront donc être réalisés par les tankers avec le cycle court que SpaceX aura été capable de qualifier (un jour, ou moins ?...).

Richard Heidmann

MARS 2020 : JEZERO, LE CRATÈRE DE TOUTES LES ESPÉRANCES

Le 18 février 2021, la NASA devrait déposer en douceur sur la planète rouge, le 5ème rover de son histoire martienne. Loin d'être une routine, c'est un exercice des plus risqués : Mars est difficile comme en témoignent les statistiques. En effet, sur les 47 tentatives d'atteindre l'orbite ou la surface, les agences spatiales comptent 21 succès, 7 demi-succès et 19 échecs. Mais à l'aube de ce nouvel exploit, il est intéressant de revenir sur le choix du site d'atterrissage : le splendide cratère Jezero.

1/ Jezero : un cratère-lake comme les autres ?

Jezero est un cratère d'impact de 49 km de diamètre et de 750 m de profondeur, localisé à 18,2°N par 77,6°E, en bordure Nord-Ouest du bassin d'impact Isidis Planitia, dans la région Sud de Nili Fossae et d'Arena Colles (Nord-Est de Syrtis Major). Il se situe à -2250 m d'altitude. Comme les cratères Gusev (166 km de diamètre) et Gale (155 km de diamètre), c'est un "cratère-lake", c'est-à-dire qu'une partie de sa géomorphologie et de sa géologie de surface laissent à penser que de l'eau liquide s'y est écoulee suffisamment durablement pour y stagner puis y laisser de profondes empreintes dans le paysage. Comme Gusev et Gale, Jezero se serait formé au Noachien, une période géologique très ancienne située il y a 3,5 milliards d'années au moins et qui a démarré avec la formation de la planète. Les conditions

astrophysiques et géophysiques de la planète sont alors totalement différentes de celles d'aujourd'hui et permettent à cette époque la présence d'eau liquide en surface de façon stable et durable. Ainsi, Jezero présente dans sa bordure Ouest une morphologie singulière formant un paléodelta, véritable exutoire d'un chenal hydrologique. C'est sans conteste un lieu d'accumulation sédimentaire qui concentre des terrasses étagées, preuves de phases intenses d'érosion et de dépôts successifs.

2/ A la poursuite des argiles et autres phyllosilicates.

Si la NASA avait adopté depuis quelques décennies déjà comme leitmotiv le désormais célèbre "*follow the water*", elle a dû au fil des missions spatiales, sensiblement préciser sa devise. Cette dernière pourrait être aujourd'hui : "*Follow clays and other phyllosilicates*". Car la révolution n'est pas initialement venue du sol où finalement seulement 4 rovers (Sojourner en 1997, Spirit et Opportunity en 2004 et Curiosity en 2012) et 4 landers (Viking 1 & 2 en 1976, Phoenix en 2007 et InSight en 2018) ont été déposés avec succès par la NASA (on précise que la surface à explorer sur Mars est équivalente aux terres émergées sur la Terre...). Non, la révolution est plutôt venue du ciel grâce aux sondes orbitales et plus précisément grâce à deux instruments remarquables : les spectromètres infrarouge OMEGA sur la sonde européenne Mars Express (2003) et CRISM sur la sonde américaine Mars Reconnaissance Orbiter (2005). Ces instruments exceptionnels ont en effet permis de localiser et d'identifier avec précision la nature minéralogique des roches martiennes, et notamment des roches sédimentaires contenant des carbonates et des argiles. Ainsi, au fil des orbites patiemment parcourues depuis bientôt deux décennies, les planétologues ont accumulé des données sur plusieurs dizaines de sites forts intéressants pouvant prétendre - de façon très étayée - à une exploration in-situ dans le but de rechercher des biosignatures ! Évidemment, avec de tels éléments scientifiques à prendre en compte, la sélection des sites d'atterrissages prioritaires à aller explorer devient totalement différente des premières époques où les décisions étaient essentiellement conduites par des contraintes d'ingénierie. De nos jours, on va sur Mars en visant des sites d'atterrissages étudiés sous toutes les coutures, par des dizaines d'équipes différentes, dont les études prennent en compte des données très hétérogènes et multi sources.

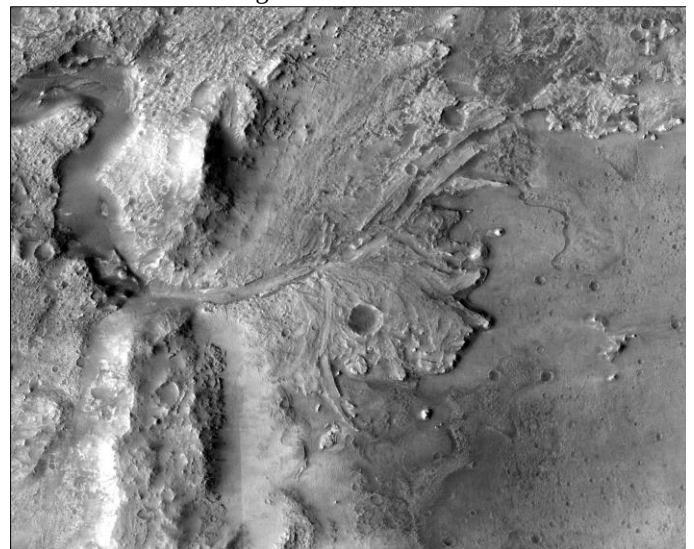


Image de la zone d'atterrissage visée : le delta Ouest. (NASA/JPL)

3/ Choisir un site d'atterrissage sur Mars est un exercice démocratique.

Nous avons assisté en 2001 au *NASA Ames Research Center*, aux débats et présentations des différentes équipes scientifiques impliquées de par le monde dans la recherche du meilleur site-candidat pour la mission du rover Spirit. Ces débats, parfois enflammés, avaient permis de se rendre compte des arguments et des convictions de chacun. A l'époque, à force de travail et de persuasion, Nathalie Cabrol avait finalement emporté la mise : le cratère Gusev qu'elle étudiait depuis 10 ans était choisi comme site prioritaire n°1 pour le 2^{ème} rover américain de l'histoire martienne. On connaît la suite.

Depuis, Spirit, Opportunity et Curiosity ont apporté des preuves formelles d'un passé martien très complexe, où l'eau liquide et stable a joué un rôle important dans les premiers temps géologiques de la planète. Ainsi, les connaissances accumulées depuis l'orbite et sur le terrain, ont permis d'affiner les arguments scientifiques. En même temps, les contraintes des ingénieurs ont grandement été modifiées grâce aux nouvelles technologies permettant des EDL totalement différents, pilotés et bien plus précis. Progressivement, les considérations géomorphologiques et géologiques ont laissé la place aux considérations minéralogiques et géochimiques.

Avec Perseverance, nous entrons dans une nouvelle ère de l'exploration martienne. Le processus d'identification du site d'atterrissage de la mission Mars 2020 a commencé en 2013 par la définition des critères scientifiques de la mission. Ces critères sont liés à la recherche de signes anciens d'habitabilité, à la recherche de biosignatures, de vie microbienne passée : Perseverance se doit aussi de prélever des échantillons valables qui seront rapatriés sur Terre dans un second temps par une mission ultérieure.

Trente-quatre sites-candidats présentant des caractéristiques intéressantes ont été étudiés et vingt-sept discutés lors d'une série de trois ateliers et d'échanges en 2014, 2015 et 2017 (dont vingt-quatre déjà étudiés pour les missions MER et MSL). Pendant cette période, la sélection progressive a conduit les planétologues à réduire les propositions à vingt-et-un sites, puis à retenir huit candidats puis enfin plus que trois sites désignés prioritaires : le cratère Jezero, la région voisine nord-est de Syrtis Major et les Columbia Hills déjà visitées par Spirit. Le site d'atterrissage final sera sélectionné par l'administrateur adjoint de la NASA en charge des missions scientifiques et son comité.

Il est à noter que plusieurs planétologues français présentaient un ou plusieurs candidats parmi les trente-quatre sites initiaux, dont Cathy Quantin-Nataf (ENS Lyon), Nicolas Mangold (CNRS, LPGN), John Carter (IAS), François Poulet (IAS) et Damien Loizeau (Univ. Lyon 1). Il est également intéressant de noter que Nathalie Cabrol (SETI Institute) défendait les Columbia Hills du cratère Gusev dans une équipe menée par le géologue de la NASA James Rice.

Au premier atelier (3 jours à Washington en mai 2014), plus de 100 planétologues ont débattu pour finalement classer Syrtis Major en 1^{ère} position, le cratère Jezero en 4^{ème} position et les Columbia Hills en 13^{ème} position. Au 2^{ème} atelier (3 jours à Arcadia en août 2015), près de 200 planétologues ont classé Jezero en 1^{ère} position, les Columbia Hills en 2^{ème} position et Syrtis Major en 3^{ème}. Il s'en fallut de peu pour que l'on retourne dans Gusev, ce qui aurait été une grande première dans l'histoire spatiale !

Rank	Site	Landing Site Scientific Selection Criteria												Overall Average	
		Characterizable Geologic Setting and History		Ancient Habitable Environment		High Biosignature Preservation Potential		Astrobiological quality of returned samples		Petrological quality of returned samples					
		Mode	Avg.	Mode	Avg.	Mode	Avg.	Mode	Avg.	Mode	Avg.	Mode	Avg.	Mode	Avg.
1	Jezero crater	5	4.9	5	4.7	5	4.4	5	4.4	5	4.3	5	4.5		
2	Columbia Hills	5	4.7	5	4.3	5	4.3	3	3.8	5	4.1	4.6	4.2		
3	NE Syrtis	5	4.7	5	3.8	3	3.3	5	3.8	5	4.8	4.6	4.1		
4	Eberswalde crater	5	5.0	5	4.5	5	4.3	3	3.4	3	3.0	4.2	4.0		
5	SW Melas	5	4.5	5	4.1	5	3.9	3	3.6	3	3.1	4.2	3.9		
6	Nili Fossae	5	4.4	3	3.4	3	3.2	3	3.4	5	4.7	3.8	3.8		
7	Nili Fossae Carbonate	5	4.2	3	3.4	3	3.2	3	3.2	5	4.3	3.8	3.7		
8	Mawrth Vallis	5	4.3	3	3.7	3	2.9	3	3.4	5	3.9	3.8	3.6		
9	Holden crater	5	4.4	3	3.4	3	3.2	3	3.2	3	3.4	3.4	3.5		
10	McLaughlin crater	3	3.6	3	3.9	3	3.0	3	3.5	3	3.5	3	3.5		
11	Hypanis	3	3.8	3	3.6	3	3.1	3	3.0	3	2.8	3	3.2		
12	Nili Fossae South	3	3.8	3	2.9	3	2.6	3	2.9	3	2.9	3	3.2		
13	Ladon Valles	3	3.8	3	3.3	3	3.1	3	2.7	3	2.7	3	3.1		
14	E. Margaritifer	3	3.7	3	3.1	3	3.5	3	2.7	3	2.7	3	3.1		
15	Coprates Chasma	5	4.1	3	2.7	3	2.3	3	2.5	3	3.7	3.4	3.1		
16	Oyama crater	3	3.3	3	3.2	3	2.8	3	2.7	3	3.1	3	3.0		
17	Eridania	3	3.2	3	2.8	3	2.5	3	2.3	3	2.4	3	2.6		
18	Nili Patera	5	4.6	3	2.4	3	2.5	1	1.4	3	2.2	3	2.6		
19	Oxia Planum	3	3.0	3	2.4	1	2.1	1	2.1	3	2.7	2.2	2.5		
20	Sabrina/Magong crater	3	3.1	3	3.0	3	2.2	1	1.8	1	2.0	2.2	2.4		
21	Hadriacus Palus	3	3.2	3	2.5	1	1.5	1	1.6	3	2.8	2.2	2.3		

Classement des 21 sites d'atterrissage discutés et votés par les scientifiques présents lors du 2^{ème} atelier sur Mars 2020. 5 critères scientifiques et la moyenne globale étaient pris en compte.

4/ Jezero : le cratère des espérances !

L'histoire géologique de Jezero est éminemment très complexe, au moins dans les débuts de son existence. Ainsi il est probable qu'un écoulement d'eau se soit prolongé suffisamment longtemps pour créer ses deux magnifiques paléo deltas lacustres, leurs terrasses étagées et les buttes résiduelles que l'on observe depuis l'orbite. A ce jour, il est toutefois impossible de préciser en combien de temps ces formations se sont mises en place et si cette période inconnue est compatible avec l'émergence puis le développement d'une forme de vie. Impossible également de dire si de la matière organique a pu s'accumuler dans les roches prises en charge puis déposées par le fleuve et ses flots. Impossible enfin d'affirmer qu'un véritable cycle de l'eau (écoulement/ruissellement - évaporation - précipitation) s'y produit de façon récurrente et soutenue.

Ce qu'il est admis par la communauté scientifique, c'est que le crater-lake s'est probablement rempli puis vidé à plusieurs reprises, suite peut-être à des ruptures catastrophiques à l'amont (libérant des quantités très importantes d'eau), et des chasses tout aussi catastrophiques par le nord-est (vidangeant alors rapidement le lac) ; un canyon trahissant peut-être une possible perte des eaux du lac vers l'aval. Les observations depuis l'orbite laissent penser que le lac était profond d'environ 250 mètres, déposant des sédiments sur près de 1000 mètres d'épaisseur, dont les splendides terrasses étagées qui feront sensation devant les caméras de Perseverance. Tout cela laisse imaginer les quantités considérables de sédiments mobilisés, transportés puis stockés dans Jezero ! Il faudra également en déterminer l'origine...

Mais ce n'est pas tout. Des roches sédimentaires contenant des carbonates, des phyllosilicates (dont font partie les argiles), des zéolites, des sulfates et des chlorures - toutes caractéristiques de cette époque ancienne où l'eau liquide existait sur Mars - sont attendues en quantité importante à la surface du delta de Jezero. Ces roches sont très prometteuses pour la recherche de biosignature. Et c'est précisément cela que la NASA recherche.

Un bémol toutefois pour compliquer l'affaire : sur Terre, il arrive que des argiles soient observées sous forme finement cristalline, constituant de la roche volcanique. C'est nécessairement lors d'une phase primaire qu'elles sont produites à la fin du processus de refroidissement des coulées de lave, et non un produit secondaire d'altération ! Une évolution chimique de la lave conduisant à la cristallisation d'argiles nécessitant très peu d'eau...

Mars ne livrera pas facilement tous ses secrets, même au plus sophistiqué des rovers !

Gilles Dawidowicz
géographe spécialiste de Mars,
secrétaire général de la Société Astronomique de France

LA VIE DE L'ASSOCIATION

L'Association Planète Mars a commencé l'année 2021 avec le tournage d'un podcast martien pour la radio France Info, en partenariat avec la Cité de l'Espace à Toulouse. Il s'agissait du tournage d'une série de 6 podcasts sur l'exploration martienne, qui sera normalement diffusé à la radio le 8 février. L'ensemble de la série couvre l'attrait de l'être humain pour la planète rouge depuis l'antiquité, le transport spatial, les missions martiennes en 2021, les facteurs humains, et la vie sur mars. C'est sur ce dernier aspect que j'ai présenté les différents défis qui attendent le premier équipage à son arrivée. Nous vous informerons de la publication de cette série sur les ondes hertziennes dès sa sortie.

Autre information sur la vie de l'Association : dans le dernier bulletin, je vous informais qu'un équipage APM/ Mars Society s'est monté pour une simulation MDRS en décembre 2021, dans le désert de l'Utah. Nous entrons actuellement dans la phase finale de sélection des expériences à dérouler sur le terrain. Le prochain bulletin mettra en avant les expériences choisies.

Prenez soin de vous et en avant Mars !

Aline Decadi

LA GÉOGRAPHIE DE FONDATION

L'équipe du projet Fondation, gagnante du 3^{ème} prix du concours 2020 de la Mars Society, dont le thème était une cité martienne d'un million de résidents, présente dans cet article, et dans un second à paraître dans le numéro 87, quelques-uns des aspects marquants de leur étude, à commencer par la question capitale des choix géographiques des lieux d'implantation.

L'emplacement de notre Cité-État a été un des choix les plus difficiles de notre projet, et il était d'autant plus critique qu'il devait être réalisé le plus en amont possible tout en respectant autant que possible l'état des connaissances.

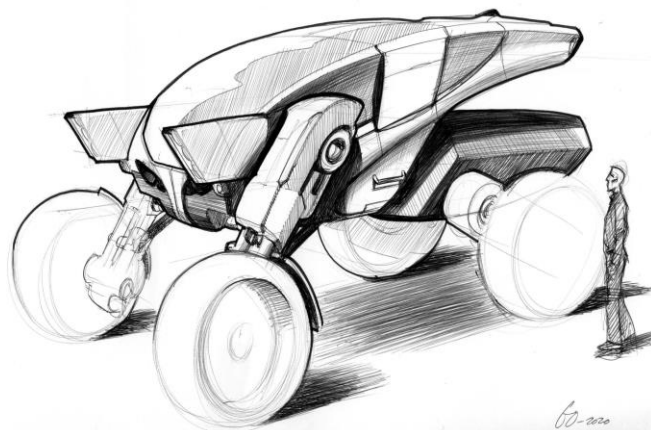
Nous pouvons résumer nos débats en deux grandes écoles : ceux qui parmi nous considéraient que l'accès à l'eau était le critère le plus important, militant donc pour un emplacement nordique où il était certain que de l'eau était disponible en grande quantité, et ceux qui considéraient que l'approvisionnement en énergie locale, donc solaire, était le premier moteur de choix, poussant à un emplacement au plus proche de l'équateur. Dans les deux cas, il s'agissait bien d'évaluer quelle était la ressource locale à laquelle il fallait pouvoir accéder facilement.

Après de nombreux échanges et le calendrier avançant inexorablement, nous avons mis le sujet au vote : il aboutit à une parfaite égalité ! Nous avons alors décidé de respecter scrupuleusement ce vote, et de couper notre Cité-État en deux parties de tailles égales.

La Cité-État de la Fondation est ainsi constituée de deux pôles urbains de taille sensiblement équivalente, alignés sur le méridien 170° Ouest. Le pôle d'Arkadia se trouve au sud de la grande plaine d'*Arcadia Planitia*, où se trouve une très grande quantité d'eau sous forme de glace sous quelques mètres de régolithe. Le pôle de Surya se trouve au fond du cratère de Nicholson, près de l'équateur dont l'emplacement a été déterminé par la combinaison favorable de l'ensoleillement, de vues dégagées sur le pic central et de la présence de glace d'eau dans la région voisine de *Medusae Fossae* [1]. Les deux implantations, souvent décrites comme la ville de l'Eau et la ville du Soleil, sont reliées par la Voie Méridienne, une route longue de km, le long de laquelle se sont installées de plus petites colonies.

Nous avons considéré qu'au tout début du peuplement de Mars, l'utilisation d'énergie nucléaire importée depuis la Terre permettait de circonvenir le faible ensoleillement des plus hautes latitudes, et que la recherche de l'eau était la contrainte principale : Arkadia est ainsi la plus ancienne colonie humaine sur Mars. Nous avons ensuite envisagé que la construction de Surya avait été retardée jusqu'à ce qu'un compromis soit trouvé entre les règles d'urbanisme et les règles de protections planétaires : ces dernières sont en effet plus sévères à l'équateur [2], là où l'eau liquide peut s'écouler et où la probabilité de trouver une forme de vie active est la plus importante. Dans notre chronologie, la Surya a donc été construite bien après, mais bénéficiant d'une énergie nettement moins coûteuse, elle s'est développée très rapidement et a pratiquement atteint la taille d'Arkadia.

Les deux agglomérations sont situées toutes les deux à basse altitude : Arkadia, située dans les basses plaines de l'hémisphère Nord est située à -3798 m tandis que Surya est située au fond du cratère Nicholson à -4423 m. La pression y est d'environ 1 kPa, et les avantages d'une pression plus élevée que la moyenne sont nombreux : réduction des contraintes structurelles, facilitation du transport spatial et aérien, refroidissement des appareils, ...



Concept de rover pressurisé élaboré dans le cadre du projet.

La Voie Méridienne relie les deux cités. Le trafic y est important à l'échelle de Mars, mais il est très ténu en comparaison des standards Terriens. La raison est d'abord politique : la principale doctrine de gouvernance sur Mars est celle de l'autonomie. Par précaution, les colonies humaines doivent être en mesure de subvenir à leurs propres besoins, et sont capables de produire tout ce qui est nécessaire, ainsi que l'essentiel du superflu. Ce principe réduit très fortement la motivation des échanges entre les Cités-États. Malgré tout, la Voie Méridienne a toutefois été tracée, et a permis des échanges venant soulager, dans certains

cas, les secteurs industriels en tension d'Arkadia et de Surya, tout en permettant aux touristes d'accéder en rover tout-terrain à des merveilles naturelles comme l'Arche de *Tartarus Colles*.



(doc. NASA/JPL)

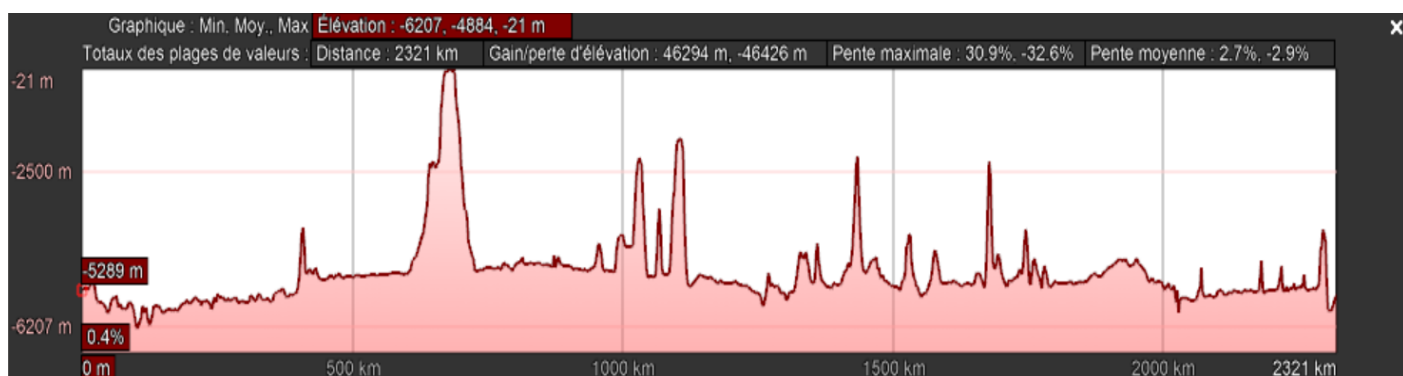
Chers membres de l'APM, sachez en tout cas qu'il est possible de bien s'amuser avec Google Earth Pro [3], en activant l'option « Mars ». Nous avons tracé cette Voie Méridienne en cherchant à minimiser le dénivelé sur l'ensemble du trajet. Au vu du profil ci-dessous, sans doute un peu de travail est-il encore à faire, pour ne pas avoir à trop pousser sur les roues.

Laurent Gauthier/Équipe Fondation

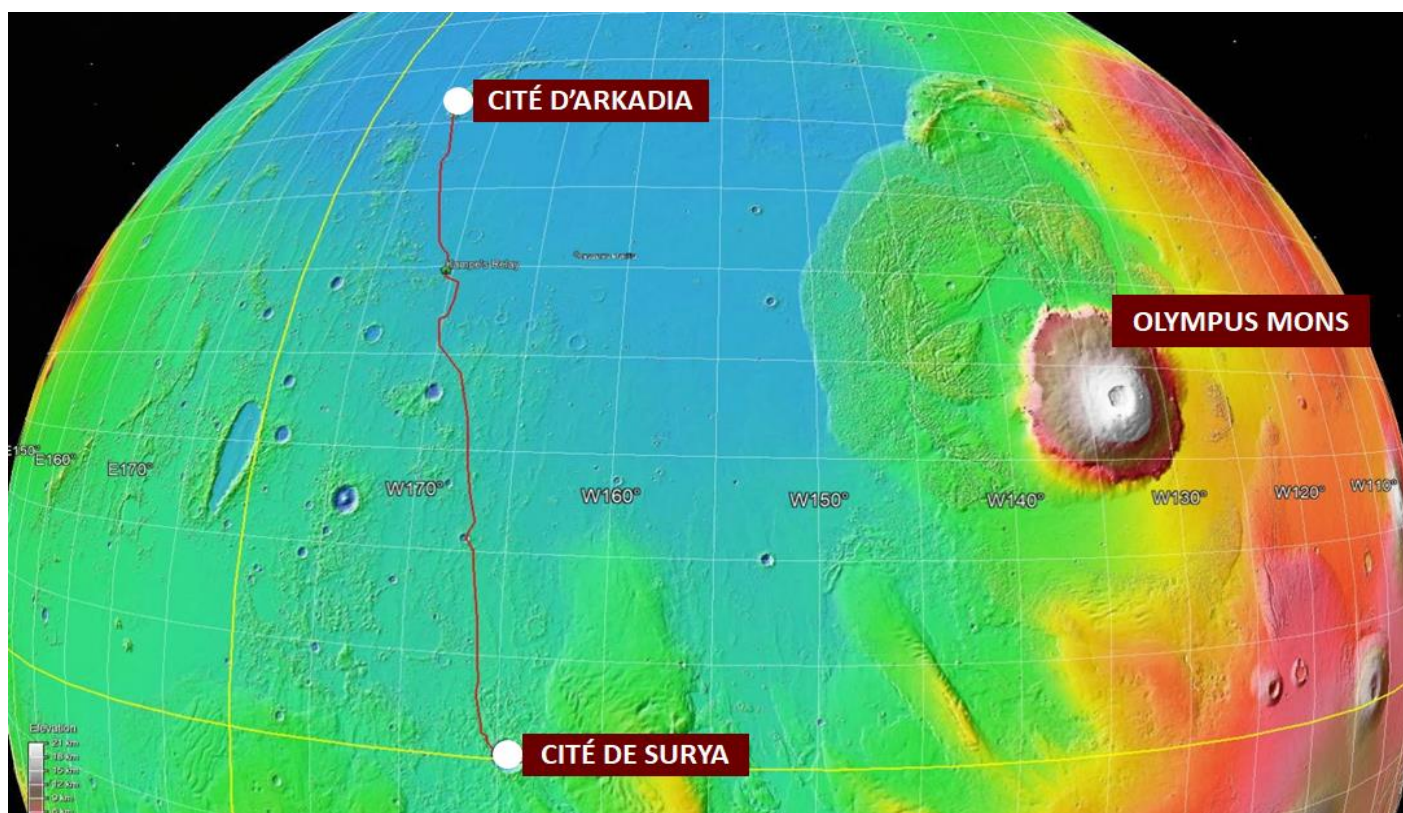
Nota : l'équipe comprenait quatre de nos membres : Rémy Navarro, Laurent Gauthier, Michel Lamontagne et Jean-Marc Salotti. contact@planetiscopemagazine.com

Références

- [1] Wilson et al 2017, *Equatorial locations of water on Mars: ...based on Mars Odyssey Neutron Spectrometer data*, Icarus.
- [2] ArXiv : <https://arxiv.org/pdf/1708.00518.pdf>
- [3] Google Earth Pro : <https://www.google.com/earth/versions/>



Profil « optimisé » des dénivelés de la « Voie Méridienne » reliant les deux agglomérations principales imaginées dans le projet Fondation.



LA NOUVELLE FRONTIERE !

Conférences, projets scientifiques,
simulations, expositions ...

Devenez membres, pionniers de
cette aventure !

Rejoignez-Nous :

www.planete-mars.com



PLANETE MARS

planete-mars.com

ASSOCIATION PLANETE MARS !

La branche française de la Mars
Society, a pour but de promouvoir
l'exploration martienne, robotique
et humaine, et l'accession de
l'Homme à ce monde



@ASSOPLANETEMARS

Ont collaboré à ce numéro : P. Clermont, G. Dawidowicz, A. Decadi, L. Gauthier, R. Heidmann, D. Ledevin.
Achevé d'imprimer : Objectif numérique 56100-Lorient. Dépôt légal : février 2021.