



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>

Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de liaison enseignants et astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (écoles d'été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.

L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement...), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

Le **CLEA** a reçu l'agrément national des associations éducatives complémentaires de l'enseignement public.

Présidents d'honneur

Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel
Cécile Ferrari

Bureau du CLEA pour 2024

Président : Frédéric Pitout
Trésorière : Sylvie Thiault
Trésorier adjoint : Jean-Louis Coustillet
Secrétaire : Grégory Silva
Secrétaire adjointe : Alina Cristian

Responsables des groupes

Cahiers Clairaut : Christian Larcher

Productions pédagogiques : Pierre Causeret

École d'été d'astronomie : Frédéric Pitout

Site web : Jean-Michel Vienney

Réseau de correspondants : Sébastien Dhérissard
et Floriane Michel



Merci à celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons :

Fawzi Benarbia, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Pierre Chastenay, Clara Decaestecker, Raphaëlle Delagrangé, Marie-France Duval, Nicolas Esseiva, Hervé Faivre, François Forget, Séverine Gomez Serdan, François Hurter, Christian Larcher, Emmanuel Marcq, Didier Paillard, Frédéric Pitout, Jean Ripert, Béatrice Sandré.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 187 afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Vénus photographiée par la sonde Mariner 10 en 1974 (images NASA retravaillées ensuite), la Terre imagée par un satellite géostationnaire (image Eumetsat), Mars et ses calottes polaires vues par le télescope spatial Hubble. Ces trois planètes telluriques possèdent toutes une atmosphère dont le profil de température est donné dans le graphique (extrait de l'article page 23). Le dossier de ce numéro visite l'atmosphère et le climat de chacune de ces planètes.

Les Cahiers Clairaut

Automne 2024

Éditorial

La partie thématique de ce numéro est consacrée au climat sur la Terre et sur ses voisines, Vénus et Mars. Parler du climat c'est d'abord s'intéresser à la température et à ses variations qui dépendent de l'effet de serre. Actuellement cet effet devient préoccupant sur Terre après avoir été plutôt bénéfique. En effet sans lui, la température sur Terre aurait été trop basse, l'eau se serait transformée en glace ce qui aurait rendu difficile, voire impossible, le développement de la vie.

La planète voisine est parfois qualifiée de planète jumelle de la Terre en raison de sa masse et de son diamètre. Pourtant sur Vénus, l'auteur de l'article nous dit que l'atmosphère est « *si chaude et si dense qu'une pizza laissée dehors pourrait y cuire en moins de deux secondes...* ». Si on ajoute que la pression est presque cent fois celle qui règne sur Terre, qu'elle est en permanence recouverte d'épais nuages imprégnés d'acide sulfurique, que sa température au sol est de l'ordre de 450 °C, c'est plutôt un enfer.

Par contre, la planète rouge ressemble à la nôtre. L'étude de sa surface prouve que dans un passé très ancien elle contenait de l'eau liquide. Mars est un terrain idéal d'études pour prévoir l'évolution sur la Terre.

Le phénomène des saisons dépend entre autres de l'obliquité de la planète concernée d'où l'article intitulé : « Les saisons sur Terre...et si ? »

Nous souhaitons bon courage à tous ceux qui ont repris le travail !

Christian Larcher (pour l'équipe)

ANNÉE 2024 - 2025
DES GÉOSCIENCES



Sommaire

Actualités

ACTUALITÉS

Brèves d'observatoires et autres nouvelles

Frédéric Pitout

2

Avec nos élèves

Maquette du zodiaque avec Arduino

Hervé Faivre

6

Dossier : Climat

9

Article de fond

Les saisons sur Terre. Et si ?

Pierre Causeret

10

Article de fond

L'effet de serre sur Terre

Didier Paillard

15

Article de fond

Le climat de Vénus

Emmanuel Marcq

23

Article de fond

Mars une planète aux multiples climats

François Forget

27

Mots croisés et climats dans CC

33

ACTUALITÉS

Observation

Le ciel d'automne 2024

Pierre Causeret

34

ACTUALITÉS

Observation

La comète C2023 A3

Jean Ripert

35

Avec nos élèves

2023 DW, un astéroïde dangereux ?

Clara Decaestecker

36

Année des Géosciences

39

Didactique

Les élèves astronomes

Pierre Chastenay

40

Lecture pour la marquise

Recension : Destination Orion d'Olivier Berné

Daniel Descout

46

Superlunes bleues

47

Solution mots croisés

47

Vie associative

Compte rendu de l'EEA 2024

Séverine Gomez Serdan, Raphaëlle Delagrangue

48



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>

MARS UNE PLANÈTE AUX MULTIPLES CLIMATS

François Forget

Planétologue au CNRS, Institut Pierre Simon Laplace (LMD), forget@lmd.ipsl.fr

L'évolution du climat sur Mars constitue une profonde énigme actuellement non résolue malgré les nombreux scénarios envisagés. La planète jeune renfermait de vastes quantités d'eau, qu'est-elle devenue ? Mars est une planète extrêmement riche d'enseignements pour comprendre les variations climatiques.

Mars aujourd'hui : un monde froid et aride

La planète Mars que nous explorons de nos jours ressemble à une petite Terre désertique. Certes l'atmosphère est essentiellement composée de dioxyde de carbone et la pression de l'air cent fois moindre. Mais à ces « détails » près, nous ne sommes pas trop dépaysés : la durée du jour est quasiment la même (24 heures et 40 minutes) et même si l'année dure presque 669 jours martiens, on retrouve un cycle de quatre saisons comparable à celui de la Terre. La circulation atmosphérique est ainsi régie par les mêmes processus que sur Terre : des alizés et des vents de mousson sous les tropiques, des dépressions et des anticyclones aux moyennes latitudes, etc.

Par un bel après-midi d'été, on trouve généralement à la surface des conditions clémentes : 20 °C, une douce brise. Cependant, l'illusion est de courte durée. Dès la nuit suivante, dans le désert martien, la température chute par dizaines de degrés. Des conditions glaciales, jusqu'à -100 °C, règnent jusqu'au lendemain matin. Sur ce monde froid, climat et météorologie sont avant tout marqués par les tempêtes de poussières soulevées par les vents et qui colorent le ciel en orange. Au-delà de 50° de latitude (l'équivalent du nord de la France), l'année est rythmée par l'accumulation d'une couche de glace de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur en automne et en hiver et qui se retire au cours du printemps. Il s'agit de glace carbonique, formée par la condensation de l'atmosphère elle-même lorsque la température devient inférieure à environ -130 °C dans la nuit polaire.

Certaines années, lors du printemps ou de l'été austral, Mars prend parfois un visage étonnant à l'occasion d'un événement météorologique unique dans tout le Système solaire : une tempête de poussière à l'échelle planétaire. En quelques jours, et durant plusieurs mois, la poussière masque quasiment la totalité de la surface. La première tempête globale de ce type a été observée en 1956. Cette année-là, Mars était exceptionnellement près de la Terre. Les astronomes furent surpris et déçus car la poussière

voilait presque tout. « Mars était aussi intéressante qu'une balle de base-ball, sans les coutures », écrira plus tard le gourou de l'astronomie américaine, Carl Sagan. Depuis, l'événement a été rarement observé. Les trois dernières tempêtes « globales » remontent à 2001, 2007, et 2018.

Les météorologues martiens ont une théorie pour expliquer pourquoi la météorologie martienne peut exploser de la sorte. Lorsque le vent soulève les poussières, celles-ci chauffent l'atmosphère en absorbant les rayons du Soleil. Cela renforce les contrastes de température et donc les vents et le soulèvement des poussières. Ainsi le système s'emballe parfois. Cependant, nul ne comprend vraiment pourquoi les tempêtes globales ont lieu certaines années mais pas d'autres...

Et l'eau dans tout cela ? Elle est présente en grande quantité sous forme solide. L'eau est surtout visible au pôle Nord, où de la glace relativement pure et blanche est directement exposée à la surface sur une région de plus de 1 000 km de diamètre. En été, le Soleil chauffe la surface glacée. La glace se sublime directement dans l'atmosphère où la circulation atmosphérique la transporte vers d'autres latitudes. La quantité d'eau impliquée est faible : si l'on précipitait entièrement le contenu en eau de l'atmosphère martienne sur la surface, on obtiendrait tout au plus une couche de glace de quelques dizaines de micromètres dans les régions les plus « humides ». Néanmoins la saturation est vite atteinte du fait des basses températures. Dans de nombreuses régions il se forme des nuages, des brumes et, en surface, du givre. Ce givre ne dépasse jamais un millimètre d'épaisseur et ne perdure au plus que quelques semaines avant de se sublimer et disparaître en été : à la surface de Mars, la glace n'est stable qu'aux pôles.

Dans ce contexte, l'eau ne peut exister à l'état liquide à la surface de Mars. Certes la température peut être positive et la pression localement compatible avec l'eau liquide (pression supérieure à celle du « point triple » de l'eau à 6.1 mbar). Cependant, lorsque l'on atteint ces conditions toute eau présente sera déjà passée sous forme vapeur. Si



Fig.1. La planète Mars, un monde aride au sol parfois couvert de glace de CO₂ et de givre d'eau, mais où l'eau liquide n'est jamais présente en surface (première image de la sonde Hope des Émirats Arabes Unis, acquise en février 2021) Crédits : MBRSC.

on crée artificiellement une flaque d'eau liquide, elle ne pourra que s'évaporer rapidement. Est-ce que cela a toujours été le cas ? Les archives géologiques acquises et analysées au cours de nombreuses missions spatiales montrent que non, que Mars a pu être autrefois couverte de glace, et même propice à l'eau liquide et à la vie.

Des ères glaciaires martiennes

Alors que Mars est aujourd'hui aride et désertique, les géologues ont découvert dans de nombreuses régions des traces indiscutables de glaciers : des moraines, des stries et des marques de fluages apparemment formées il y a seulement quelques dizaines de millions d'années, parfois quelques centaines de milliers d'années. Des sondages radar et l'utilisation de « spectromètre à neutron » (sensible à la présence de glace dans le proche sous-sol) ont confirmé qu'une bonne part de la planète est couverte de restes de glaciers, témoins d'ères glaciaires aussi spectaculaires que récentes aux échelles géologiques. Comment cela a-t-il été possible ?

Sur la Terre, les oscillations de l'obliquité, pourtant minimes ($\pm 1,3^\circ$), ont joué un rôle important dans l'apparition des périodes glaciaires. Pour Mars, des calculs réalisés par le français Jacques Laskar ont montré que l'obliquité oscillait de $\pm 10^\circ$ tous les 10 000 ans, et surtout que sa valeur moyenne subissait une lente évolution erratique sur des échelles de temps de plusieurs millions d'années. Au total, l'obliquité a pu varier entre zéro et plus de soixante degrés ! Qu'a-t-il alors pu se passer sur Mars ? La modélisation numérique des climats, éclairés par l'analyse de la géologie, apporte des réponses. Si on fait l'expérience informatique d'incliner Mars au-delà de 25° (la valeur actuelle de l'obliquité), les régions polaires

sont tournées vers le Soleil en été et chauffent fortement. Cela entraîne la sublimation la glace carbonique présente sous le pôle Sud où un réservoir équivalent à toute l'atmosphère actuelle a été découvert par radar en 2011. Ainsi la pression atmosphérique a pu doubler dans un passé récent. Au pôle Nord le chauffage de la glace d'eau libère de grandes quantités de vapeur dans l'atmosphère et la couverture nuageuse augmente considérablement, contribuant probablement à un effet de serre. Au-delà de 30° à 40° d'obliquité, la glace et la neige s'accumulent pour former un manteau de glace aux moyennes latitudes et des glaciers sur les flancs des montagnes sous les tropiques. Des traces de glaciers ont d'ailleurs été retrouvées à ces endroits sous formes de moraines et de dépôts de glace enterrés. Tout indique donc que Mars à haute obliquité se présente comme une planète blanche, en partie couverte d'un épais manteau de glace d'eau, et entourée de nuages denses.

À l'inverse, lorsque l'axe de rotation de Mars est redressé et que l'obliquité approche de 0° , l'atmosphère de CO₂ se condense dans les régions polaires. Sur les faces à l'ombre des montagnes de l'arctique martien, on trouve d'ailleurs d'étranges moraines formées par d'anciens glaciers très fluides, probablement composés de glace carbonique. Lorsque tout le CO₂ était piégé sous forme de glace, l'atmosphère de Mars devait être vingt fois plus fine qu'aujourd'hui et essentiellement composée d'azote et d'argon. La surface de Mars était alors pétrifiée et immobile, sous un ciel noir même en plein jour.



Fig.2. Le printemps dans la région polaire nord. Les hautes latitudes sont couvertes de neige carbonique condensée pendant la nuit polaire qui a précédé. Comme sur Terre, les contrastes de températures entre le pôle et les tropiques sont à l'origine de dépression et de tempêtes qui soulèvent la poussière minérale à la surface dans des fronts venteux en forme de spirale. Des brumes de glace d'eau apparaissent autour. (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Malin Space Science Systems).

La jeunesse de Mars : le temps des lacs et des rivières

Nous avons vu que pendant la majorité de son existence, et au moins durant les deux derniers milliards d'années, l'environnement martien n'a fait qu'osciller entre les périodes « glaciaires » et « interglaciaires » racontées ci-dessus. L'atmosphère était relativement fine, les températures basses et l'eau n'était presque jamais présente sous forme liquide à la surface. Cependant, l'étude de Mars a montré qu'il en était autrement lorsque la planète était jeune, il y a plus de 3,5 milliards d'années (Mars s'est formé comme toutes les planètes il y a environ 4,5 milliards d'années). Contrairement à la Terre – soumise à une érosion intense et à la tectonique des plaques –, Mars a conservé à sa surface de nombreux terrains qui remontent à cette époque. Partout sur ces terrains, entre les cratères d'impact accumulés dans la durée comme sur la Lune, on observe des vallées fluviales asséchées d'aspect analogue aux réseaux hydrographiques terrestres ainsi que des restes de lacs souvent remplis de sédiment et d'alluvions, parfois déposés sous forme de delta à l'embouchure d'une rivière. En utilisant la spectroscopie, on a pu y détecter des minéraux produits par l'altération de l'eau liquide (par exemple, des argiles) ou par son évaporation (par exemple des sels de sulfates).

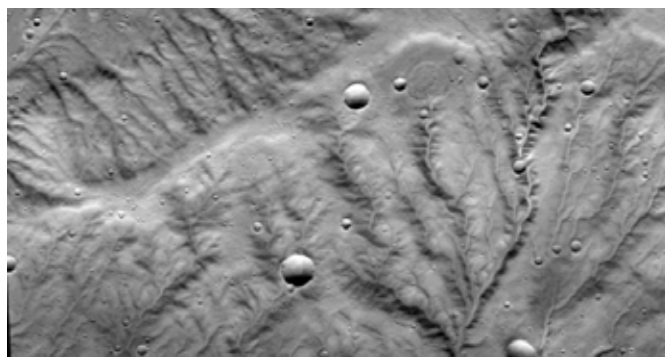


Fig.3. Des réseaux de vallées de rivières aujourd'hui asséchées observées sur les terrains anciens de Mars, formés il y a 3,8 milliards d'années (crédits : NASA/JPL-Caltech/Malin Space Science Systems).

C'est donc une tout autre planète Mars, aujourd'hui disparue, que nous racontent ces vestiges géologiques. Cet ancien monde est particulièrement fascinant car il correspond à une époque où la vie est apparue sur Terre. Pourquoi pas aussi dans les rivières et lacs martiens ? Mener l'enquête sur ces questions constitue un projet irrésistible. Ainsi la plupart des robots que nous envoyons à la surface (Opportunity, Spirit, Curiosity, Perseverance et bientôt Exomars) ainsi que de nombreux instruments d'observations en orbite ont pour objectif premier d'explorer cette ancienne planète Mars plutôt que l'environnement actuel. Leurs enquêtes ont confirmé que Mars a réellement été propice à l'eau liquide et à la vie.

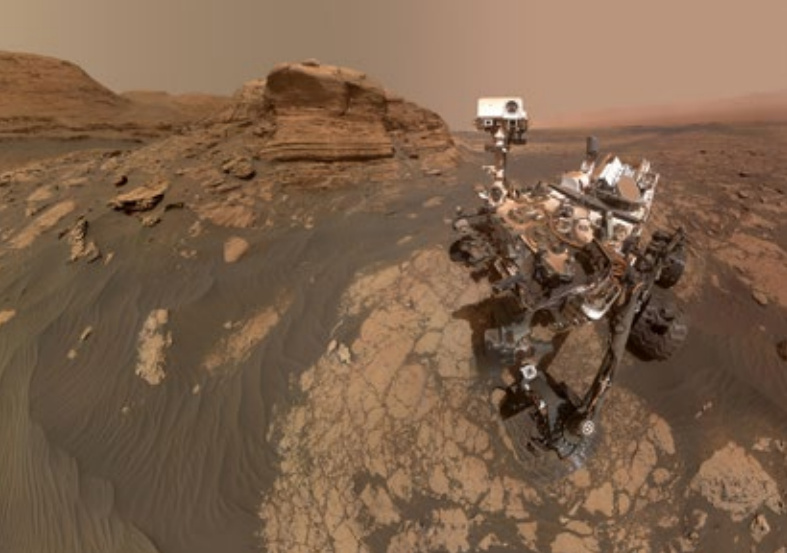


Fig.4. Autoportrait du rover Curiosity de la NASA devant des dépôts lacustres déposés dans le cratère Gale il y a plus de 3,3 milliards d'années. (Crédit NASA/JPL-Caltech/MSSS).

Cependant, des questions demeurent. Mars a-t-elle connu un climat clément et humide pendant des dizaines de millions d'années, ou de façon intermittente ? Un océan s'est-il formé ? Certains lits de rivières pourraient-ils avoir été façonnés sous des glaciers ? Les minéraux signatures de l'eau liquide ont-ils été formés dans des lacs comme sur Terre ou sont-ils plus souvent le produit de processus hydrothermaux souterrains ? Et enfin : quel processus climatique a-t-il permis la présence d'eau liquide en surface à une époque où le Soleil jeune était 25 % moins lumineux qu'aujourd'hui ? Ce dernier point demeure une énigme pour les climatologues. En effet, ils ont pu démontrer que l'effet de serre d'une atmosphère composée de dioxyde de carbone (CO_2) et de diazote (N_2) (telle que prévue par la théorie) n'aurait pas pu suffisamment réchauffer la planète, quelle que soit son épaisseur. Toutes sortes de scénarios plus complexes ont donc été envisagés.

Par exemple, il a été proposé que les grands impacts d'astéroïdes, relativement nombreux à l'époque, ont pu générer épisodiquement des réchauffements accompagnés d'intenses précipitations. Cependant, l'estimation de leur effet cumulé semble ridicule comparé à ce qui est requis pour l'érosion les grands réseaux fluviaux et la formation des épais sédiments lacustres observés. Un effet de serre atmosphérique supplémentaire est requis, mais lequel ? Les recherches actuelles spéculent sur la présence d'une importante quantité de dihydrogène (H_2) qui aurait pu être relâchée par volcanisme. Mélangé avec du CO_2 , le dihydrogène H_2 peut en effet agir comme un puissant gaz à effet de serre en absorbant le rayonnement infrarouge thermique lorsque les molécules de CO_2 et H_2 rentrent en collision. Cependant, H_2 tend à s'échapper rapidement. Il reste à comprendre comment les volcans martiens ont pu en produire suffisamment à cette époque...

Après les rivières : eau intermittente et... un océan ?

Entre -3,5 et -3 milliards d'années et dans une moindre mesure jusqu'à -2 milliards d'années, les archives géologiques indiquent que Mars a continué à être marquée par des écoulements d'eau liquide capable de créer des vallées fluviales, mais de manière plus locale et épisodique. Un autre type de morphologie liée à l'eau liquide typique de cette ère géologique sont les immenses vallées de débâcles (« outflow channels » en anglais) dont la largeur peut dépasser 100 km pour 1 000 km de long et 100 m de profondeur.

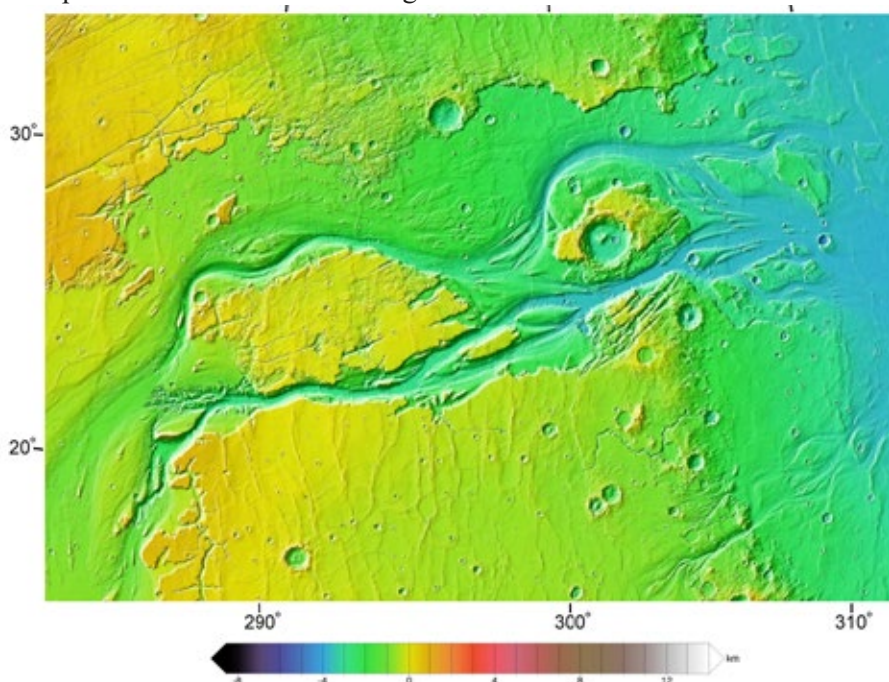


Fig.5. Carte topographique de Kasei Vallis, une des grandes vallées de débâcle martienne (« outflow channel ») formée entre -3,6 et -2 milliards d'années, probablement par une combinaison de volcanisme et de processus glaciaires. L'image fait 1 600 km de large. (Crédit Wikipedia / Areong).

Ces vallées de débâcle ne possèdent pas d'affluents et leur origine géographique est localisée. Sur leur fond, des chenaux multiples ont contourné des obstacles topographiques, comme les cratères d'impact, et donné naissance à des structures en forme de larme dans le sens de l'écoulement. D'après les géomorphologues, seuls des écoulements brutaux et brefs, mettant en jeu des volumes d'eau

extraordinaires, peuvent expliquer les caractéristiques des vallées de débâcle. L'eau proviendrait par exemple de l'interaction entre un volcanisme actif et un sol chargé en glace, à l'origine de la vidange brutale d'immenses nappes phréatiques, sans que le climat n'ait eu besoin d'être beaucoup plus chaud qu'aujourd'hui.

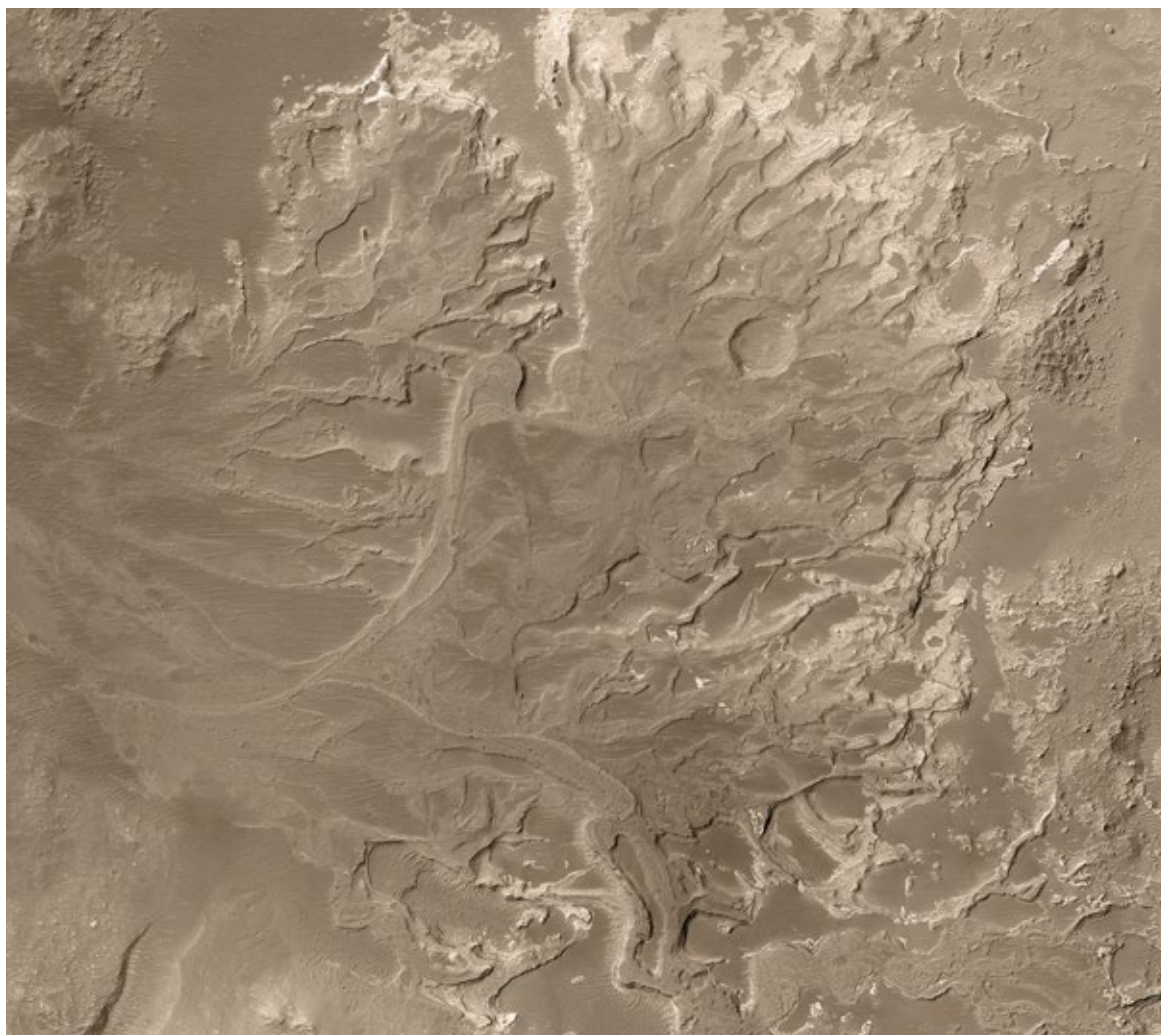


Fig.6. Un delta d'alluvions déposés au fond du cratère Eberswalde à l'embouchure d'une ancienne rivière datant de l'ère Noachienne, il y a environ 3,8 milliards d'années. (Crédit: NASA/JPL/Malin Space Science Systems).

Qu'est devenue toute cette eau ? Elle a dû s'accumuler dans les basses plaines de l'hémisphère nord. Elle pourrait être à l'origine des grandes quantités de glace souterraine observée là, sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, par radar ou via l'analyse des éjectas de cratères. Qu'en était-il à l'époque des grandes inondations ? Une hypothèse fascinante suggère qu'elle aurait pu parfois former un vaste océan autour du pôle Nord, jusqu'à environ 45° de latitude. Cette idée a longtemps semblé spéculative, mais elle a repris force à partir de 2016 lorsque de curieuses structures géologiques ont été attribuées aux conséquences d'un, voire deux tsunamis océaniques. Ils auraient eu lieu il y a environ 3,4 milliards d'années conséquemment à des impacts d'astéroïdes à l'origine de deux cratères de 30 km observés plus au nord. Un paradoxe demeure cependant : comment un océan a-t-il pu être présent aussi longtemps sans être associé à des pré-

cipitations sur ses rives et donc à la formation de lits de rivières ? On ne n'en observe pas clairement. L'enquête, passionnante, suit son cours.

Pourquoi Mars n'est-elle pas restée propice à l'eau liquide et à la vie ?

Le destin aride et froid de la planète rouge ne résulte pas de la perte de son eau. Il reste beaucoup de glace aux pôles et dans le sous-sol martien. Le problème est plutôt que l'essentiel de l'atmosphère de CO₂ a disparu. Elle était nécessaire pour la présence d'eau liquide afin de maintenir une pression et un effet de serre suffisants. Trois types d'hypothèses ont été envisagés pour expliquer la disparition de l'ancienne atmosphère martienne :

L'atmosphère de CO₂ s'est-elle condensée aux pôles de Mars ?

Après les premières missions Mariner et Viking, dans les années 1970, il a été proposé que de grandes quantités de dioxyde de carbone pourraient tout simplement être enfouies dans les régions les plus froides, condensées sous forme de glace carbonique ou adsorbées¹ dans les pores du sol aux hautes latitudes. Cette spéculation est à la base des nombreux projets de « terraformation » de Mars, qui visent à rendre Mars propice à la vie voire à la vie humaine en la dotant d'une épaisse atmosphère. Dans ces projets, il suffirait de réchauffer les pôles (avec des miroirs ou des bombes thermonucléaires, comme le propose Elon Musk) pour libérer de grandes quantités de gaz et augmenter l'effet de serre. En réalité, les missions spatiales suivantes ont démontré que ces réservoirs sont limités à quelques millibars disponibles sous forme de glace de CO₂ (sondage par radar) et que le permafrost martien est saturé en eau plutôt qu'en CO₂. Ce n'est pas ainsi que l'ancienne atmosphère a disparu, et que l'on pourrait la reconstituer.

Réaction avec la surface.

En présence d'eau liquide, le dioxyde de carbone de l'atmosphère réagit chimiquement avec les roches de la surface pour former des carbonates (des roches calcaires), ce qui a pour effet de réduire le volume atmosphérique. Sur Terre, ce processus est contrebalancé par le constant « recyclage » des roches, grâce à la tectonique des plaques. Les carbonates reforment en profondeur du gaz carbonique qui est réinjecté dans l'atmosphère par les volcans. Sur Mars, en l'absence de tectonique des plaques, une grande partie de l'atmosphère aurait pu être définitivement transformée en carbonates à la surface. Une question se pose alors : où sont ces carbonates ? Après des années de recherche par spectro-imagerie depuis l'orbite et in situ, très peu de carbonates ont été découverts affleurant à la surface. L'environnement martien a-t-il pu détruire les carbonates en surface tout en les accumulant en profondeur ? On peut aussi imaginer qu'ils ne se soient jamais formés, par exemple si les lacs martiens étaient relativement acides (ce qui inhibe la formation des carbonates) ou qu'un autre composé masque leur signature spectroscopique.

Échappement vers l'espace.

La capacité d'une planète ou d'une lune à conserver son atmosphère dépend avant tout de sa masse et de sa gravité. Sur notre Lune, le simple mouvement thermique des molécules de gaz suffit à les éjecter dans l'espace. Sur la Terre, au contraire, la perte par échappement est négligeable (sauf pour l'hydrogène et l'hélium qui sont très légers). Qu'en était-il sur Mars à la gravité intermédiaire

entre la Lune et la Terre ? (3,72 m.s⁻² contre 1,62 m.s⁻² et 9,81 m.s⁻²). La planète était assez massive pour que l'échappement thermique du CO₂ devienne négligeable. Cependant d'autres processus complexes ont été identifiés comme pouvant conduire à l'éjection d'atomes et de molécules, comme certaines réactions chimiques énergétiques induites par les rayons ultraviolets du Soleil, ou l'interaction du vent solaire avec les ions. L'étude de ces processus a été l'objectif de plusieurs missions spatiales comme MAVEN (NASA), Mars Express (ESA) ou la mission Hope des Émirats Arabes Unis. La conclusion de ces études est que plusieurs centaines de millibars de CO₂ ont bien pu s'échapper via ces processus, mais qu'il reste très difficile d'évaluer quantitativement la quantité intégrée perdue depuis la fin de l'ère des lacs et des rivières. Dans ce contexte il a longtemps été suggéré que la perte de l'atmosphère martienne aurait été la conséquence de la disparition du champ magnétique de Mars il y a environ 4 milliards d'années. Cette disparition a pu être démontrée en découvrant que les roches martiennes les plus anciennes – et seulement elles – ont gardé une aimantation rémanente due au champ magnétique présent à leur formation. La présence d'un champ magnétique a pour conséquence de dévier le vent solaire et donc de modifier les processus d'érosion de l'atmosphère associés à l'entraînement des ions chargés par ce vent de particules chargées issues du Soleil. Est-ce que cela limite vraiment l'échappement ? Des études récentes montrent que cela n'a rien d'évident. Certaines suggèrent même que sur un monde comme Mars l'échappement pourrait être favorisé par la présence d'un champ magnétique interne...

Conclusions

Le système climatique de la planète Mars est aujourd'hui extrêmement actif et riche d'enseignements pour comprendre la météorologie et le climat sur notre planète, dans un esprit de « climatologie comparée ». De plus, Mars a connu au cours de son existence des visages très divers. Grâce à ses riches archives géologiques, nous avons la chance de pouvoir explorer en un lieu une extraordinaire variété de mondes. En particulier, il est incontestable que dans sa jeunesse, il y a plus de trois milliards d'années, Mars a été longuement couverte de lacs et de rivières, peut-être d'un océan, avec une forte activité hydrothermale. Ces multiples visages de la planète Mars sont la raison pour laquelle, parmi les splendeurs du Système solaire, la petite planète désertique qu'est devenue Mars reste la première cible des agences spatiales. ■

1 L'adsorption repose sur la propriété qu'ont les gaz de se fixer sur les parois solides, et ce d'autant plus qu'elles sont froides.



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>

2023 DW, UN ASTÉROÏDE DANGEREUX ?

UNE ÉTUDE FAITE DANS LE CADRE DES OLYMPIADES DE PHYSIQUE

Clara Decaestecker, lycée Saint-Jacques, Hazebrouk
élève ayant pris part à la réalisation du projet « 2023 DW »
lors des Olympiades de physique 2023-2024.

Les Olympiades de physique eurent lieu cette année pour leur 31^e édition, nous invitant, nous lycéens, à présenter des projets touchant à divers domaines de la physique.

Ces Olympiades offrent la chance à qui le souhaite de s'inscrire aux épreuves, en collaboration avec son lycée et avec l'aide de ses professeurs. Le but des Olympiades n'est pas simplement d'obtenir un prix, puisqu'elles permettent à tous les élèves d'acquérir des compétences et des bases solides en termes d'autonomie, de recherche, et d'expression orale et écrite.

Pour le lycée Saint-Jacques (59), les Olympiades de physique sont une institution, et ce sont 2 professeurs de physique-chimie qui sont chargés de l'encadrement des élèves : Jean-Sébastien THIBAUT et Laurence MUSY.

Cette année, étant élèves en classe de terminale, nous nous sommes lancés à plusieurs dans cette aventure en espérant aboutir à un projet cohérent... et ce fut réussi puisque notre projet intitulé « 2023 DW » fut retenu pour être présenté à la finale nationale des Olympiades de physique à Paris, ce 3 février dernier.

Pour vous donner une idée de production, vous découvrirez ci-après notre projet dans ses grandes lignes, ainsi que la mise en place de ce dernier.

« 2023 DW » est un projet liant physique et astronomie que nous avons initié dès septembre 2023, dans le but d'étudier les potentiels impacts de cratères sur Terre grâce à des modélisations simples. Pour trouver un projet, les moyens sont multiples : YouTube, les journaux, les livres, voire même les informations télévisées. Dans notre cas, nous avons décidé d'étudier les météorites en trouvant des idées de manipulations dans un livre, puis les informations télévisées et les médias nous ont donné l'idée d'étudier l'astéroïde 2023 DW.

Alors, nous avons étudié la chute d'astéroïdes, et plus particulièrement celle de l'astéroïde 2023 DW, un astéroïde plutôt proche de la Terre mesurant entre 50 et 100 mètres de diamètre, dans divers milieux : sol de faible densité, sol de forte densité et même le milieu aquatique ! Ce qui a rendu notre projet intéressant, c'est sans aucun doute la simplicité des manipulations effectuées, nous permettant d'obtenir des grandeurs physiques concrètes.

Dans cet article, nous vous présenterons quelques exemples de travaux réalisés, qui, nous l'espérons, vous donneront envie de prendre part à votre tour à cette aventure très enrichissante.

Dans chaque cas le principe est simple : faire tomber une bille en chute libre, perpendiculairement au sol. Ainsi, les variations de milieux de chute et de tailles de billes nous permettent d'obtenir un panel de résultats important.

1. Tout d'abord nous vous présentons la chute de bille métallique dans... du sable !

Pour cela retrouvez la liste du matériel nécessaire ci-dessous :

- des billes métalliques de divers diamètres ;
- du sable ;
- une potence de 2 mètres ;
- un mètre ;
- des bacs en plastique transparent ;
- un électro aimant (+ générateur et fils) ;
- des cures dents.



Fig.1. Photo du montage.

Lors de cette manipulation nous mesurons quel était le diamètre d'impact du cratère en fonction de la hauteur de chute dans un même sable. En effet, nous avons prélevé des valeurs de diamètre pour chaque hauteur et ainsi obtenu un tableau de valeurs.

Seulement, il est d'autant plus intéressant d'obtenir beaucoup de mesures, c'est pourquoi nous avons réitéré l'opération :

- en changeant de billes (en choisissant des billes plus petites et plus grandes) ;
- en changeant le sable, et donc le milieu impacté par la chute (en choisissant des sables de densité forte et d'autres de densité faible, pour représenter les différents milieux terrestres).

Ces mesures, entrées dans des tableurs, nous ont permis d'établir des graphiques formant dans chacun des cas, une courbe d'allure puissance.

Pour des mesures dans un sable de forte densité, l'exposant dans notre équation est $\frac{1}{3}$.

Pour des mesures dans un sable de faible densité, l'exposant dans notre équation est $\frac{1}{4}$.

L'obtention de ces résultats est tout à fait cohérente avec les lois de Donald Gault et ses collaborateurs qui identifient l'exposant $\frac{1}{4}$ au phénomène d'éjection de matière lors de l'impact et l'exposant $\frac{1}{3}$ au phénomène de déformation de matière lors de l'impact.

On peut, avec les équations obtenues calculer l'énergie libérée par 2023 DW suivant le milieu impacté :

- si la chute se fait sur un sol de faible densité :

$$E = (1000/0,11)^4 = 6,8 \times 10^{15} \text{ J} ;$$

- si la chute se fait sur un sol de forte densité :

$$E = (1000/0,08)^3 = 1,95 \times 10^{12} \text{ J}$$

Dans tous les cas les effets sont considérables et engendrent de graves conséquences. Cependant la survie de la Terre n'est pas mise en jeu puisqu'il faudrait qu'un astéroïde beaucoup plus gros de l'ordre de 100 km de diamètre la percute pour mettre fin à son existence. En effet, on peut comparer l'énergie libérée par éjection de matière potentielle de 2023 DW à celle du Meteor Crater qui est équivalente et qui n'a pas subi de dégâts importants à l'échelle mondiale. Cette chute pourrait néanmoins détruire une ville si elle survenait. Ainsi, pour conclure par rapport à cette modélisation, on peut ainsi calculer l'énergie libérée par n'importe quel astéroïde ou météorite en fonction de son milieu de chute.

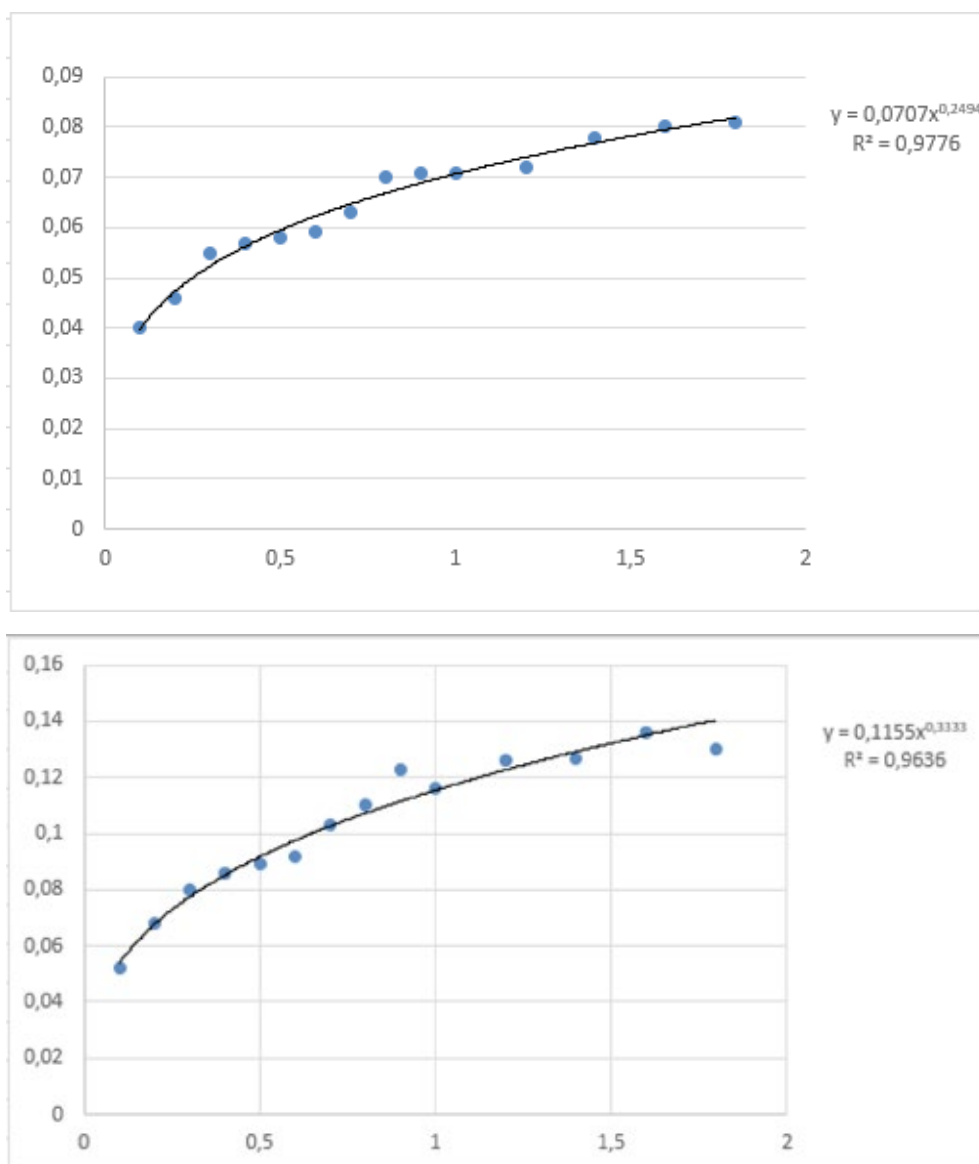
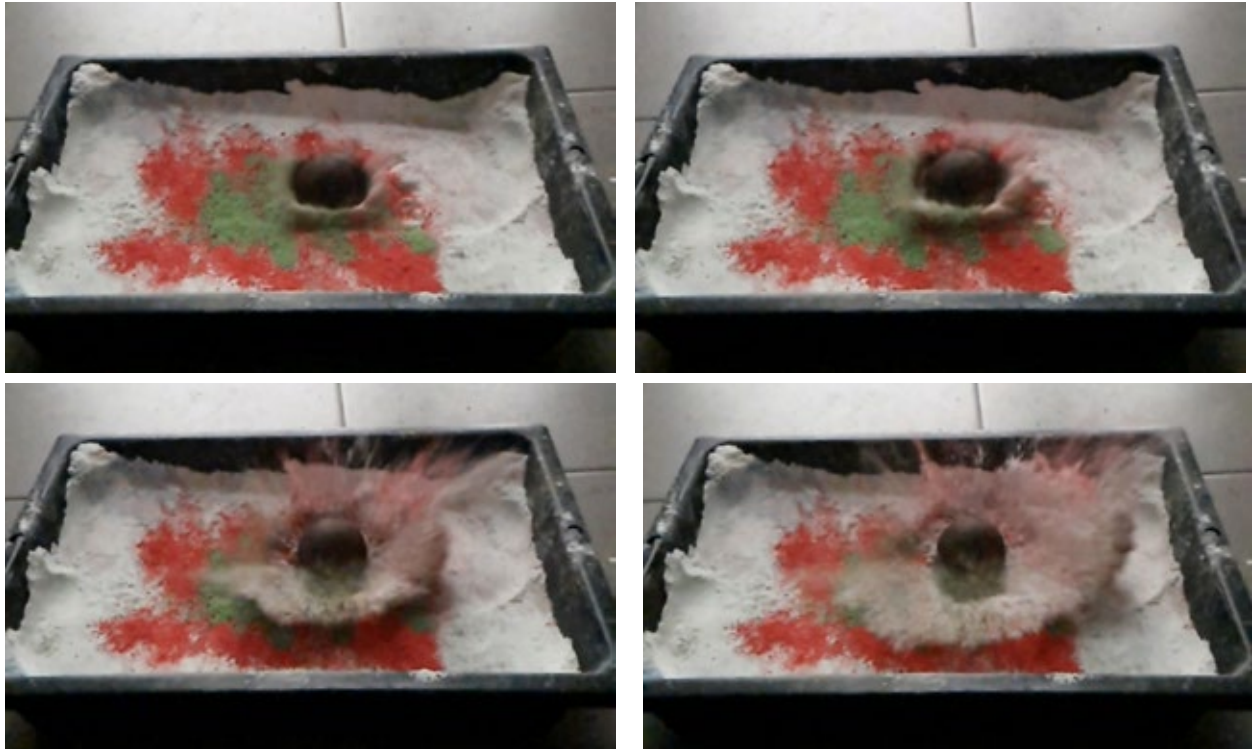


Fig.2. Courbes représentatives du diamètre du cratère en fonction de la hauteur de chute (en haut le milieu de chute est de densité faible et en bas de densité forte).

2. Pour illustrer de manière beaucoup plus exagérée et visuelle les phénomènes d'éjection de matière et de déformation de matière, voici des manipulations très simples que nous avons également effectuées :



La chute de billes dans de la farine avec de la poudre de craie.



La chute de billes dans un sable qu'on a fortement humidifié.

3. Puisque la Terre est composée à 70 % de mers et océans, notre astéroïde a plus de chance d'entrer en collision dans l'eau !

C'est ici que Sylvain Bouley a pu nous apporter son aide, en nous expliquant comment se formait un tsunami et en nous donnant des pistes quant à certaines modélisations.

D'abord en faisant tomber nos billes en chute libre dans une piscine, et en filmant, on peut mesurer les longueurs d'ondes des vagues par un pointage.

De plus, en réalisant une chute libre dans un aquarium aux parois transparentes, on peut également mesurer l'amplitude de cette vague lorsque la bille est assez grosse. On a pu mesurer la hauteur de la vague seulement pour la plus grosse bille mesurant 60 mm de diamètre, puisqu'elle était clairement visible à l'écran. Grâce au logiciel Generis on trouve une vague de 2,3 cm de haut.

Concernant la chute dans l'eau et d'après des recherches on a pu conclure.

Il existe pour résumer 2 cas. Dans un premier cas l'astéroïde mesure moins de 100 mètres de diamètre et alors il possède une probabilité presque nulle de ne pas se fragmenter entièrement en entrant au contact de l'eau puisque cette dernière freinera fortement le bolide ce qui provoquera sa désintégration dans l'océan : pour ce cas-ci le mouvement de l'eau est perturbé mais les phénomènes tel que les tsunamis sont très rares et minimes. **C'est le cas de 2023 DW !**

Dans un second cas, l'astéroïde possède un diamètre supérieur à 100 mètres de diamètre et alors, pour ce cas il



Taille de la bille (en mm)	Célérité de l'onde (m/s)	Longueur onde (m)
13	0,275	0,009
20	0,324	0,011
28	0,396	0,013
40	0,407	0,014
60	0,48	0,016

Photo de la manipulation et tableau de valeurs obtenues

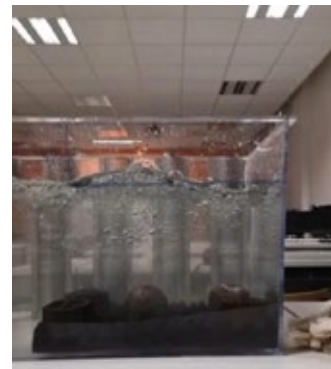
n'y a en théorie pas de fragmentation ni de désintégration. En effet, comme sur le sol terrestre, l'astéroïde chutera jusqu'au fond de l'océan pour former un cratère. Et dans ce cas il y aura formation d'un tsunami qui peut être dévastateur pour l'homme s'il se trouve à proximité des côtes.

Finalement, il ne fait pas de doutes que l'impact que pourrait causer 2023 DW serait considérable à une échelle relativement petite (si on se base sur celle mondiale) s'il chutait. Cependant, gardons en mémoire que cette éventualité existe bel et bien et que même si les risques paraissent faibles, il est important de s'informer.

Ainsi, le fruit de notre travail nous a permis d'en apprendre beaucoup sur divers phénomènes physiques tout en utilisant nos cours et les notions acquises lors de nos années de lycée.

Prendre part à ce projet fut également une expérience enrichissante humainement.

En effet, nous avons pu rencontrer des jeunes de notre âge venant de régions différentes, mais également des professeurs de l'enseignement supérieur étant venus nous apporter conseils. Tout en fournissant un travail conséquent chaque semaine (2 heures dédiées aux Olympiades au lycée ainsi que le travail personnel fourni lors de notre temps libre), nous avons pris un énorme plaisir à réaliser ce projet. Les adultes encadrants ont toujours été particulièrement bienveillants avec nous, que ce soit les jurys durant les épreuves départementales et



Photos de la manipulation effectuée.

nationales, ou nos professeurs. Nous sommes par ailleurs extrêmement reconnaissants du soutien et de l'aide que nos professeurs ont pu nous apporter.

Pour terminer, nous espérons que notre témoignage, grâce à cet article, vous a permis d'en apprendre plus sur les Olympiades de physique et qu'il vous a donné envie d'y participer aussi bien en tant que candidat, professeur ou simple visiteur !

Si vous souhaitez obtenir davantage de précisions quant à notre projet « 2023 DW », notre compte-rendu reste disponible sur le site web des Olympiades de physique¹, sous le nom du projet lui-même, réalisé par Clara Decaestecker et Adrien Viallon.

¹ <https://www.olympphys.fr/public/odpf/odpf-archives/31/fichiers/memoires/publie/31-eq-L-memoire-2023-DW.pdf>



2024 - 2025 ANNÉE DES GÉOSCIENCES

Tout au long de l'année scolaire 2024-2025, l'Année des géosciences rapprochera les mondes de l'enseignement et de la recherche pour mettre en lumière la richesse des sciences de la Terre et de l'environnement, leurs enjeux et leurs métiers. À cette occasion, l'ensemble de la communauté des géosciences se mobilise pour proposer des actions de découverte de la recherche, de ses enjeux et de ses métiers.
(<https://www.insu.cnrs.fr/fr/anneegeosciences>)

Dans le cadre de cette Année des géosciences, le Clea a soumis une proposition sur le thème "Mesurer la Terre, mesurer les planètes" qui a été labellisée. Cette labellisation concerne la formation des enseignants et la production de ressources pédagogiques, dont le dossier sur les climats de ce numéro des Cahiers Clairaut.



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>