

Les Cahiers Clairaut

Printemps 2021

Éditorial

L'année 2021 débute favorablement pour l'astronomie avec la réussite de l'atterrissage du rover (ou astromobile) américain dans le cratère Jezero de la planète Mars. D'après les spécialistes ce cratère d'impact devait contenir de l'eau il y a environ 3,5 milliards d'années. Il s'agit du début d'une mission dont l'objectif ultime est de rapporter sur Terre des échantillons du sol martien afin de déterminer s'ils renferment ou non des traces de molécules organiques.

L'année 2021 sera aussi propice aux astronomes amateurs ; ils pourront apporter leur concours aux professionnels dans la nouvelle campagne Phému21.

Cette campagne, qui a lieu tous les six ans, concerne les « Phénomènes mutuels » des satellites de Jupiter. Elle nécessite de réaliser des enregistrements précis de courbes de lumière lors des éclipses ou des occultations de ces satellites.

Le thème de ce numéro concerne le phénomène des marées. Un sujet qui semble à premier abord bien classique mais qui mérite d'être approfondi. Les forces de marées constituent un paramètre essentiel pour expliquer les interactions puissantes entre une planète géante et ses lunes. Elles sont également essentielles pour modéliser les fusions gigantesques entre les galaxies avec parfois la production de bébés-galaxies.

Christian Larcher pour l'équipe

Sommaire

Article de fond	
Mars2020, le rover Perseverance s'est posé sur Mars	
Léa Griton	p 2
Article de fond	
Observer les phénomènes mutuels des satellites de Jupiter de mars à novembre 2021	
Jean-Eudes Arlot	p 5
Thème : les marées	p 9
Article de fond	
Les marées, notions de base	
Pierre Causeret	p 10
Avec nos élèves	
Les marées à l'école	
Jean-Luc Fouquet	p 15
Article de fond	
Les marées au sein des systèmes de planètes géantes	
Valéry Lainey	p 20
Mots croisés	p 23
Avec nos élèves	
Un atelier sur les marées	
Véronique Hauguel	p 24
Article de fond	
Les marées galactiques	
Pierre-Alain Duc	p 29
Observation	
Le ciel du printemps 2021	
Éclipse partielle de Soleil du 10 juin 2021	
Pierre Causeret	p 35
Article de fond	
L'observatoire Pierre Auger	
Corinne Bérat	p 37
Lecture pour la marquise	
Savoirs, opinions, croyances	
Pourquoi la Terre est ronde ?	
Daniel Paupart	p 42
Construction	
Un cadran solaire de berger avec du matériel de récupération	
David Alberto	p 44
Vie associative	
Colloque AstroEdu-FR (7 - 9 janvier 2021)	
Frédéric Pitout	p.48
École d'été d'astronomie 2021	p.48
Solutions des mots croisés	p 48

Mars2020, le rover Perseverance s'est posé sur Mars

Léa Griton, chercheuse en postdoc à l'IRAP, Toulouse.

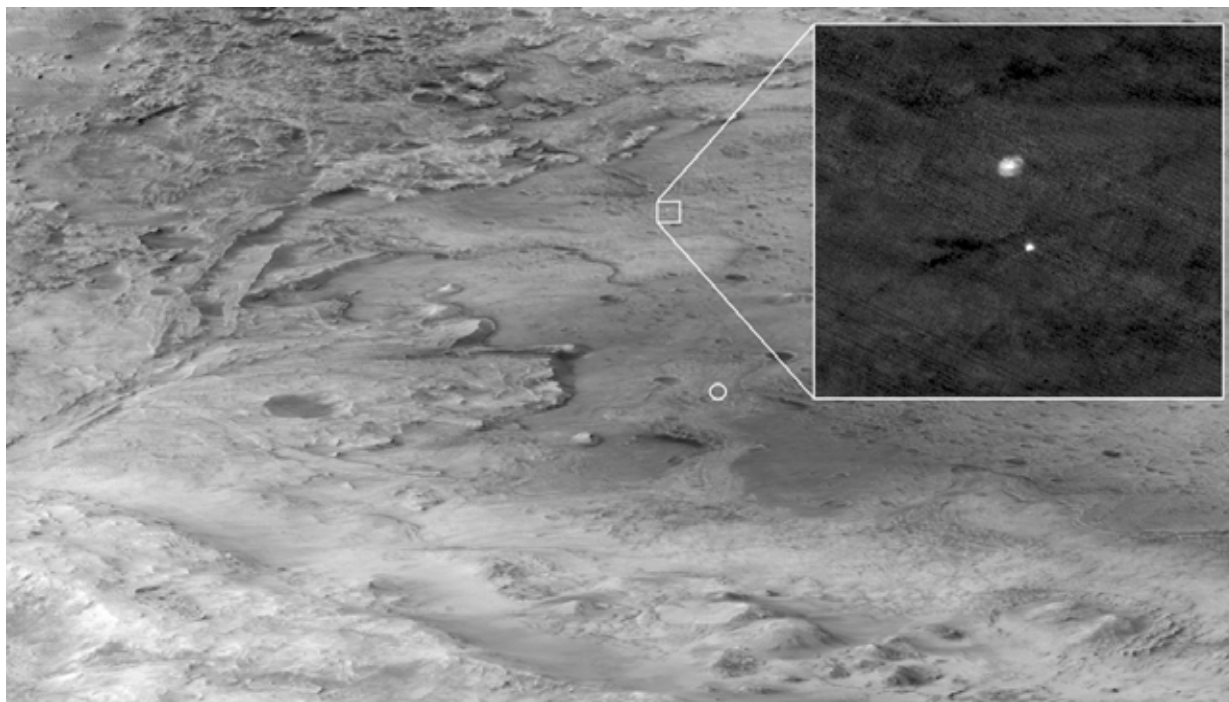


Image.1. Sur cette image déjà historique, on peut voir l'étage de descente du rover Perseverance de la NASA tomber à travers l'atmosphère martienne, son parachute traînant derrière lui, sur cette image prise le 18 février 2021 par la caméra HiRISE (High Resolution Imaging Experiment) à bord de l'orbiteur de reconnaissance de Mars. L'ancien delta de la rivière, qui est la cible de la mission Perseverance, peut être vu en entrant dans le cratère de Jezero depuis la gauche. Crédits : NASA/JPL-Caltech.

Le projet de la Nasa « *Mars2020* » a une mission bien définie : il s'agit de prélever des échantillons du sol martien, de les analyser et de les stocker sur Mars, afin qu'une future mission puisse venir les chercher et les rapporter sur Terre. Le rover *Perseverance*, dont le nom a été choisi par un collégien lors d'un concours organisé par la Nasa, a parcouru 480 millions de kilomètres en sept mois, à bord de la sonde spatiale qui le protège depuis le lancement, le 30 juillet 2020, de Cap Canaveral en Floride (États-Unis).

Mars2020 doit atteindre quatre objectifs : un objectif astrobiologique, un objectif géologique, puis les troisième et quatrième objectifs qui relèvent davantage du défi technologique. Le rover va en effet assurer le prélèvement d'échantillons, mais aussi leur stockage en divers sites stratégiques pour une future mission de retour d'échantillons vers la Terre. La mission *Mars2020* embarque aussi des instruments et un petit hélicoptère, *Ingenuity* (dont le nom a été choisi par une lycéenne, toujours après un concours

organisé par la Nasa) afin de démontrer la faisabilité de certaines technologies et de mieux connaître la météo martienne, cette fois-ci en vue d'une mission habitée sur la planète rouge.

L'atterrissage, le 18 février 2021, était en soi une aventure technologique internationale, extrêmement périlleuse, qui repousse toujours plus loin le désir d'exploration de l'humanité.

Pesant un peu plus d'une tonne, *Perseverance* ressemble beaucoup à son prédécesseur, le désormais célèbre *Curiosity*, dont la masse n'est que de 899 kilos (et qui est toujours en activité, après plus de 3 000 jours terrestres de bons et loyaux services). C'est le plus gros rover jamais envoyé sur Mars, vingt-quatre ans après le premier rover martien qui faisait la taille d'un four micro-onde. *Perseverance* s'inscrit donc dans la tradition des missions martiennes de la Nasa tout en étant délibérément une étape préparatoire de missions qui ne sont pas encore sélectionnées.

Mars2020, atterrissage ! Crédits : NASA/JPL-Caltech



Image.2. Éclaté de la sonde, montrant les différents éléments qui ont joué un rôle pendant l'atterrissage du rover Perseverance, que l'on voit ici roues repliées.

Le véhicule de croisière (en haut de l'éclaté ci-dessus) s'est détaché en premier, 10 minutes avant le « touch down ». C'était lui qui communiquait avec la Terre pendant la croisière, ajustant sa trajectoire en se repérant par rapport aux étoiles. Dans les derniers jours avant l'atterrissage, sa trajectoire a été analysée avec un haut degré de précision et les procédures pour l'atterrissage sont actualisées au fur et à mesure : le site d'atterrissage était beaucoup plus précis que lors des missions précédentes, il ne fallait absolument pas atterrir dans un cratère voisin ! Ensuite, le véhicule de rentrée atmosphérique, équipé d'une antenne et surtout d'un parachute, a pris le relais. Il a déployé le parachute à environ 10 km d'altitude, 240 s après le début de la rentrée atmosphérique. Le bouclier thermique avant (tout en bas de l'éclaté ci-dessus), a été largué 20 secondes plus tard. Le véhicule de rentrée a pu alors utiliser un radar et un système optique pour repérer le meilleur site d'atterrissage possible. Une minute plus tard, à 2 000 mètres d'altitude, le véhicule de rentrée a été à son tour largué par l'étage de descente. Cet étage-là était équipé de moteurs qui permettent de réduire la vitesse verticale à 20 mètres par seconde (au lieu d'environ 400 m/s au moment du largage de l'étage d'entrée), et d'annuler la vitesse horizontale. La descente propulsée a permis de choisir le site d'atterrissage avec une grande précision, puis de réaliser un atterrissage tout en douceur du rover, qui a été descendu par câbles jusqu'à la surface.



Image.3. Cette image exceptionnelle fait partie du film effectué par l'étage de descente de la mission Mars2020 le 18 février dernier. À 21 mètres au-dessus du sol à vitesse verticale descendante constante de 75 cm par seconde, le rover a été descendu au bout de trois câbles de 7,50 m de long, tout en déployant ses roues. Crédits : NASA/JPL-Caltech.

Des traces de vie martiennes ?

Du choix du site d'atterrissage jusqu'aux performances de ses instruments, *Perseverance* doit d'abord répondre à la question : y a-t-il jamais eu de la vie sur Mars ? Le choix du site d'atterrissage, d'abord : *Perseverance* se posera dans le cratère de Jezero, situé à l'extrémité ouest d'Isidis Planitia, un bassin d'impact géant juste au nord de l'équateur martien. C'est un endroit où il y a un fort potentiel pour trouver des signes fossilisés de vie ancienne. On y trouve aussi certains des paysages les plus anciens et les plus intéressants scientifiquement sur Mars. On pense en effet que le cratère de 45 km de large a abrité un lac il y a 3,5 milliards d'années – le mot « Jezero » signifie « lac » dans plusieurs langues slaves – ainsi qu'un ancien delta de rivière, que l'on devine sur les images de Mars prises depuis l'espace.



Image.4. Capture d'écran de l'outil mis en place par la Nasa pour visiter le site d'atterrissage de Mars2020 dans le cratère Jezero à partir d'images satellites. On y voit la vallée et le « delta » où de l'eau a pu couler il y a des millions d'années.

Cet ensemble lac-delta aurait pu recueillir et préserver d'anciennes molécules organiques et d'autres signes potentiels de vie microbienne dans l'eau et les sédiments qui se sont écoulés dans le cratère il y a des milliards d'années.

Les instruments, ensuite : une des grandes nouveautés par rapport aux suites instrumentales de *Curiosity* s'appelle *SHERLOC* (« Scanning Habitable Environments with Raman & Luminescence for Organics & Chemicals») et détecte les molécules organiques et les minéraux. En effet, la présence de molécules organiques sera déterminante pour sélectionner les échantillons qui voyageront peut-être un jour vers la Terre.

Il faut aussi connaître l'environnement minéral des échantillons pour comprendre le contexte dans lequel les traces de vie ont pu apparaître et se développer. *SHERLOC* utilise un laser ultraviolet pour scruter la surface. Ce laser, en interagissant avec le sol martien, émettra une lumière subtilement différente selon les matières organiques et minérales présentes.

L'instrument dispose également d'une caméra qui permet de prendre des images microscopiques des grains de roche et des textures de surface autour de l'échantillon analysé, toujours pour pouvoir connaître au mieux l'environnement des échantillons.

Les roches passées au laser fin

L'analyse des roches et des paysages n'est pourtant pas en reste. L'aspect géologique de cette expédition est le deuxième objectif par ordre de priorité. Les caméras sont plus complémentaires et plus performantes encore que sur *Curiosity*, avec notamment, pour la première fois, des caméras couleur !

« SuperCam bénéficie bien sûr d'une étroite filiation avec ChemCam sur *Curiosity* » indique Pernelle Bernardi, ingénieure de recherche CNRS, au Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique (LESIA) de l'Observatoire de Paris, et qui a reçu la médaille de Cristal 2020 du CNRS : « nous avons repris le principe de la spectroscopie LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) qui permet d'analyser la composition chimique des roches et une caméra (couleur cette fois-ci) pour faire des images de contexte. Mais nous avons ajouté deux autres techniques pour étudier la minéralogie des sols et étudier l'atmosphère : les spectroscopies Raman et infrarouge. Nous avons également ajouté un microphone qui permettra d'écouter l'onde de choc émise par le plasma LIBS, les vents martiens et les sons émis par le rover (rotations du mât, roues et freins, les autres instruments...) ».

SuperCam, qui succède à ChemCam, est donc plus complexe que son prédécesseur et va ainsi recueillir des informations complémentaires.

Le grand public et les élèves sur Mars

Après le succès de *Curiosity* (4,5 millions d'abonnés sur Twitter, trois fois plus que Buzz Aldrin), *Perseverance* est avant tout le rover du public.

La Nasa a mis en place des moyens faramineux pour l'associer à cette mission : le rover nommé par un collégien et l'hélicoptère par une lycéenne, la réservation de « tickets pour Mars » à votre nom, stockés sur une carte mémoire à bord du rover, des outils en ligne pour suivre le voyage de la sonde dans le milieu interplanétaire, avec sa vitesse en temps réel (le TGV n'a qu'à bien se tenir, on parlait de vitesses supérieures à 80 000 km/h !), dispositif impressionnant pour suivre l'atterrissage en direct !

Mais surtout, deux instruments sur sept sont entièrement consacrés à la préparation d'un vol habité. *MEDA* est une station météorologique complète, afin de connaître au mieux les conditions météorologiques au fil du temps, et en particulier des saisons.

MOXIE est un instrument conçu pour produire de l'oxygène à partir du CO₂ martien. Le but n'est pas de terraformer la planète rouge, mais de pouvoir produire de l'oxygène sur place pour pouvoir éventuellement faire le plein sur Mars pour un « lanceur retour » vers la Terre.

L'instrument *SHERLOC* emporte avec lui des échantillons de combinaisons d'astronaute afin de tester leur résistance à l'environnement martien ! *Mars2020* prépare ainsi le premier pas d'une femme ou d'un homme sur une autre planète.



Image.5. La très attendue première image de la surface envoyée par une caméra de contrôle à bord du rover *Perseverance* est arrivée peu après 22 h sur Terre, devant les millions de personnes qui ont suivi l'atterrissage sur l'un des nombreux « live » organisés, notamment celui de la Nasa. Crédits : NASA/JPL-Caltech.

Observer les phénomènes mutuels des satellites de Jupiter de mars à novembre 2021

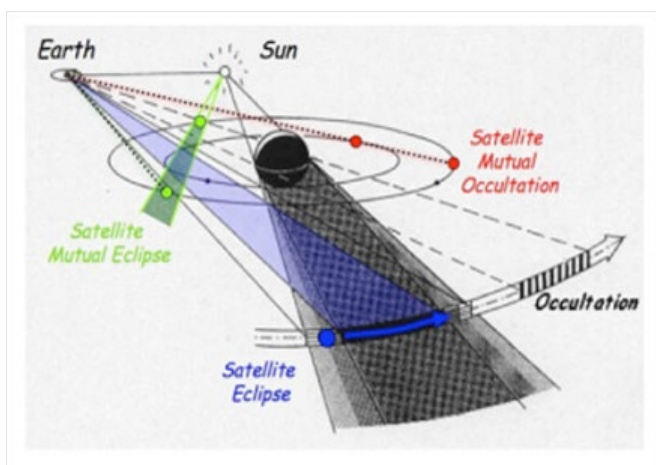
Jean-Eudes Arlot

La planète Jupiter gravite autour du Soleil avec une période de 12 ans. Tous les 6 ans le Soleil et la Terre traverse le plan équatorial sur lequel orbitent les satellites galiléens de Jupiter. Depuis la Terre il est alors possible d'observer une série d'éclipses et d'occultations entre ces satellites. C'est la période dite des PHEMU (phénomènes mutuels des satellites de Jupiter). Les astronomes amateurs sont invités à faire des relevés photométriques de ces événements et de les transmettre aux professionnels afin d'améliorer la connaissance précise des orbites des satellites.

Introduction

En 2021, ce sera l'équinoxe sur Jupiter, c'est-à-dire que le Soleil va passer dans le plan équatorial de la planète. Les orbites des satellites galiléens se trouvent dans ce plan, si bien que des éclipses et des occultations entre satellites vont se produire durant cette période. L'observation de ces phénomènes rares est essentielle. Les données obtenues permettent d'approfondir notre connaissance de ce système et une campagne d'observation internationale va se dérouler à cette occasion, avec une forte participation des astronomes amateurs.

Bien que faciles (les satellites galiléens de Jupiter ont une magnitude de l'ordre de 5 et sont observables avec une petite lunette) les observations de ces phénomènes requièrent un soin particulier pour pouvoir être utilisées pour la validation des modèles de formation et d'évolution du système jovien. La mobilisation des observateurs pour cette opportunité qui ne se reproduit que tous les 6 ans est nécessaire et il est temps de se préparer.



Le principe des phénomènes mutuels et des éclipses classiques.

L'enjeu scientifique

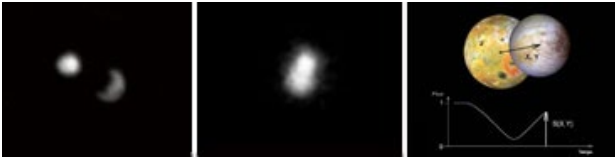
Le système des satellites galiléens est complexe, c'est un système solaire en miniature – Ganymède étant de la taille de Mars ou de Mercure – dont l'évolution rapide est riche d'enseignement. Les volcans de Io, la banquise et les éventuels océans d'Europe restent inexpliqués et mal connus. Des modèles de formation et d'évolution de ce système sont à l'étude et des observations astrométriques précises permettant de décrire les orbites sont essentielles pour la validation de ces modèles. Les sondes spatiales fournissent des données précieuses mais sur des temps trop courts pour valider des modèles d'évolution, aussi des observations du sol sont nécessaires. Il s'avère que les observations de ces phénomènes rares ont une précision proche de celles des sondes ce qui entraîne une mobilisation internationale pour ces observations.

Le contexte

Ces phénomènes, observables pendant six mois tous les six ans, sont observés depuis l'équinoxe de 1973. Les prédictions nécessitant des calculs par ordinateur, ces observations sont donc récentes mais existantes depuis une quarantaine d'années elles permettent l'accumulation de données précieuses. La table jointe donne le bilan des observations pour chaque période favorable. Il est à noter que si l'équinoxe sur Jupiter tombe au moment de la conjonction Jupiter-Soleil, cela rend les observations très difficiles et donc peu nombreuses. En 2021, l'équinoxe jovien a lieu le 2 mai, l'opposition de Jupiter et du Soleil le 20 août et la plupart des observations se feront entre ces deux dates. La déclinaison de Jupiter sera négative, favorisant les observations dans l'hémisphère sud. Les observations seront bien entendu possibles dans l'hémisphère nord mais Jupiter sera assez bas sur l'horizon.

La méthode

Les phénomènes mutuels ressemblent un peu aux éclipses classiques des satellites entrant dans l'ombre de Jupiter et qui se produisent en permanence. Malheureusement ces éclipses n'offrent pas la même qualité d'observation que les phénomènes mutuels. Observées intensivement aux XVIII^e et XIX^e siècles, les éclipses par Jupiter ont été supplantées par les observations photographiques, aujourd'hui elles-mêmes dépassées par les phénomènes mutuels.



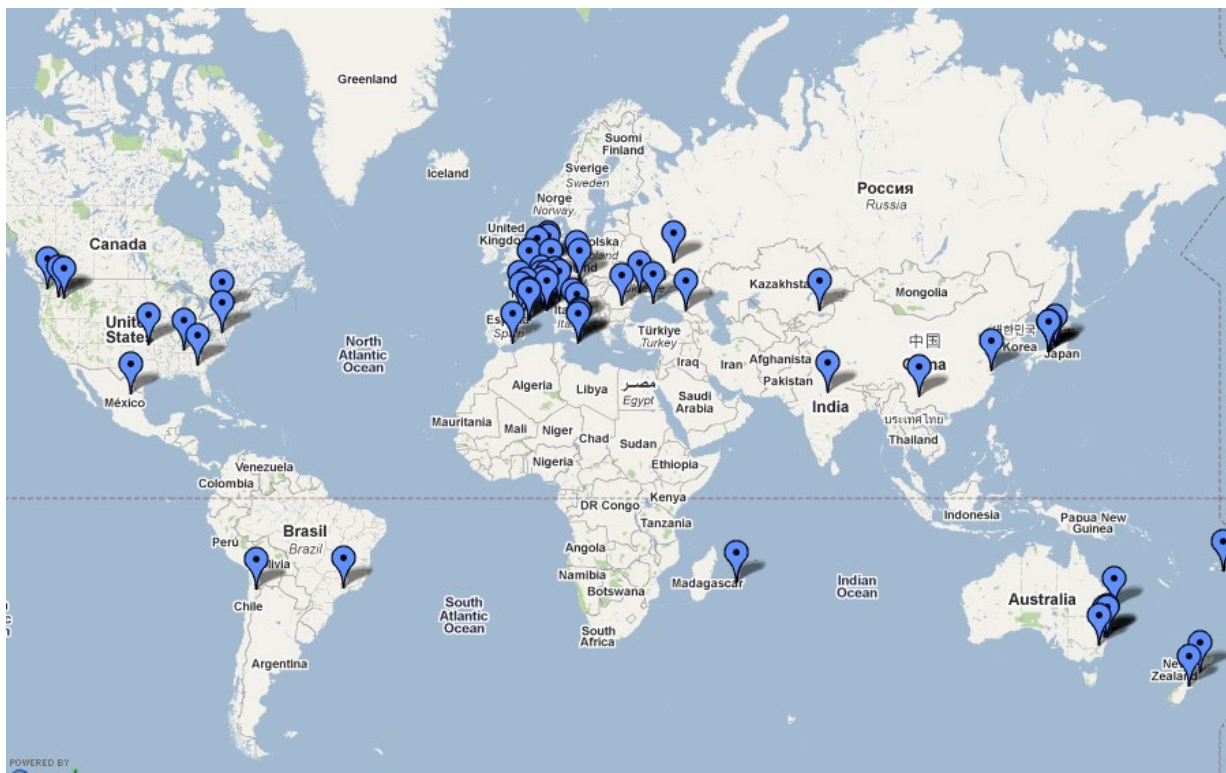
De gauche à droite : l'ombre de Io sur Ganymède, l'occultation d'Europe par Ganymède et un schéma montrant comment se construit la courbe de lumière. La qualité des images n'est pas essentielle : mieux, il est recommandé de défocaliser légèrement les images pour éviter la saturation et obtenir une meilleure photométrie.

L'observation des phénomènes mutuels est une observation photométrique : on réalise une suite

d'images (un film à la vitesse de quelques images par seconde, la cadence vidéo étant souvent utilisée bien qu'un peu trop rapide) et on mesure la quantité de lumière réfléchiée par les satellites durant le phénomène : soit une occultation d'une partie d'un satellite par un autre, soit une éclipse d'un satellite par un autre. L'absence d'atmosphère sur les satellites permet un signal net peu bruité et facile à modéliser contrairement aux éclipses par Jupiter gênées par l'atmosphère épaisse de la planète.

Un grand soin doit être apporté à cette observation pour être sûr qu'aucune lumière parasite ne va troubler l'observation.

Toutes les observations réalisées doivent être connectées entre elles : pour cela chaque image doit être datée en Temps Universel (le UTC de l'horloge parlante ou du GPS) avec une précision de 0,1 seconde de temps. Sans cela, l'observation est inutilisable. Des informations et un protocole d'observation est donnée sur le site web de la campagne www.imcce.fr/phemu



La répartition des sites d'observation en longitude est essentielle pour observer le maximum de phénomènes © Google Maps.

Les résultats

L'accumulation d'observations a déjà permis d'obtenir des résultats intéressants sur le système de Jupiter. Ainsi, les volcans de Io sont générés par les marées créées par Jupiter sur ce satellite et l'étude de l'évolution de l'orbite de Io, grâce à toutes les

observations astrométriques accumulées, a permis de démontrer que Io était en équilibre thermique : il ne se refroidit pas, son volcanisme étant entretenu par les marées provoquées par Jupiter. Plus directement, les volcans de Io ont été détectés lors d'une occultation de Io observée dans l'infrarouge.

Campagne	Taille des télescopes		Nombre de	
	< 50 cm	> 50 cm	sites	observations
	amateurs	professionnels		
1973	4	20	24	94
1979	4	7	11	22
1985	12	16	28	166
1991	37	19	56	374
1997	32	10	42	292
2003	34	15	42	377
2009	70	12	74	457
2015	74	13	75	609

Des statistiques sur les précédentes campagnes : en 1973, les amateurs observaient visuellement ; en 1979, la période favorable aux phénomènes avait lieu durant la conjonction Jupiter-Soleil. Les équinoxes dans l'hémisphère nord sont ceux de 1979, 1991, 2003 et 2015.

Choix d'un phénomène mutuel à observer

Si vous souhaitez observer un phénomène mutuel, trois critères doivent être appliqués lors du choix du phénomène à observer :

- Jupiter doit être bien observable, suffisamment haut au-dessus de l'horizon et le Soleil doit être suffisamment sous l'horizon. Les observations sont possibles au crépuscule mais nécessitent quelques précautions ;
- les images du phénomène doivent être faciles à enregistrer, celui-ci doit se produire suffisamment loin du disque brillant de la planète (les images infrarouges avec des télescopes à focale longue permettent d'observer des phénomènes au plus près de Jupiter) et il doit avoir une chute de magnitude suffisante. La baisse de flux prévue doit être supérieure à 5 % pour être facilement mesurée. Cependant, lorsque plusieurs événements se produisent au cours d'une nuit, on peut essayer d'observer des événements même difficiles ;
- un autre satellite, différent de celui qui est occulté ou éclipsé doit être présent dans le champ afin d'être une référence photométrique pendant l'observation permettant d'éliminer la brume ou les nuages légers passant dans le ciel pendant le phénomène car nous faisons de la photométrie relative.

Nos logiciels interactifs permettront à l'observateur de trouver les meilleurs phénomènes observables depuis son propre site d'observation.

Visibilité des phénomènes pour un site donné sur :

<http://nsdb.imcce.fr/multisat/nsszph517he.htm>

Il convient aussi de bien identifier les satellites pour observer celui qui va être occulté ou éclipsé. On obtiendra la configuration du système jovien à tout moment sur :

<http://nsdb.imcce.fr/multisat/nssima5he.htm>

Le télescope à utiliser

Les satellites galiléens sont très lumineux et les observations peuvent être faites avec de très petits télescopes. Cependant, certains critères indiquent si un télescope est capable de faire des observations utiles :

- l'instrument doit être très stable pour garantir des images stables pendant toute l'observation et le guidage du télescope doit être sûr afin d'éviter un décalage des images pendant l'observation.
- lunettes ou télescopes même avec une petite ouverture peuvent être utilisés pour observer les phénomènes mutuels.

Détecteur et filtre

L'observation est une observation photométrique (mesure de la chute de luminosité lors de l'occultation ou de l'éclipse) réalisée grâce aux images enregistrées. L'observation sera la mesure d'un flux lumineux et il faut éviter tous les dispositifs modifiant le flux lumineux : tout système anti-éblouissement ou tout gain automatique rendra l'observation inutile, assurez-vous que ces dispositifs sont inexistantes ou débrayables sur votre détecteur.

La longueur d'onde dans laquelle vous ferez l'observation doit être bien connue pour faciliter la réduction. Vous pouvez combiner le profil de

sensibilité du détecteur avec un filtre pour diminuer la lumière provenant des satellites galiléens trop brillants mais vous devrez l'indiquer. Le filtre CH4 à 890 nm peut être utile : il assombriera le disque de Jupiter permettant d'observer même avec Jupiter proche des satellites.

La datation du phénomène

Le timing de l'événement est fondamental. Toutes les observations faites dans le monde seront rassemblées pour l'analyse de la dynamique des satellites. Afin de relier les observations entre elles, nous avons besoin que chaque image soit datée en UTC (temps universel) à 0,1 seconde près. Plusieurs méthodes peuvent le permettre. Dans tous les cas, chaque image doit être datée selon une échelle de temps (interne ou locale). Cette échelle de temps peut être liée à UTC via le GPS, mais si ce n'est pas possible, il suffit de déterminer la différence par rapport à UTC avant et après le phénomène afin d'obtenir la différence et une éventuelle dérive de l'échelle. L'interpolation permettra alors de revenir en UTC pour chaque image. Notez que ce point est très important. Sans synchronisation UTC, une observation est inutile.

Faire l'observation

Tout d'abord, l'observateur doit identifier le champ bien à l'avance. Nous fournissons des configurations sur notre site Web afin d'identifier les satellites et la taille du champ. Nous avons besoin de la présence de trois satellites dans le champ, le troisième, pas trop proche des autres étant la référence photométrique. Si le satellite éclipsant est suffisamment éloigné du satellite éclipsé, il peut être utilisé comme référence photométrique. Lors de l'observation, veillez à enregistrer le bon champ en identifiant correctement le nord et l'est. Choisissez soigneusement le temps d'intégration et la fréquence des images. Une plus grande intégration du temps (temps d'exposition pour chaque image) augmentera le rapport signal / bruit mais méfiez-vous de la forte luminosité des satellites. Plus de 10 images par seconde rendront la réduction difficile.

La prédiction des phénomènes n'est pas très précise et le phénomène peut commencer plusieurs minutes avant le temps prévu. Alors, commencez à observer au moins cinq minutes avant le début prévu. À des fins photométriques, enregistrez les satellites impliqués séparément avant ou après le phénomène. Pour cela, vous devrez peut-être faire des images (pendant une ou deux minutes) des satellites 15 ou 30 minutes avant ou après chaque phénomène. La plupart du temps, cela n'est possible qu'avant

ou après l'événement en raison du mouvement des satellites s'approchant de Jupiter ou de l'arrivée du crépuscule.

Pour que la séquence d'observation soit soigneusement suivie :

- être sûr de l'échelle de temps ;
- faire une observation des satellites séparément soit avant soit après le phénomène ou mieux, avant et après ;
- commencer l'observation au moins cinq minutes avant le début prévu et arrêter au moins cinq minutes après la fin prévue.

La réduction des données

Le résultat final de l'observation est une courbe de lumière, c'est-à-dire un fichier de valeurs successives du flux lumineux, chacune datée en UTC ou à une échelle de temps référencée à UTC. Vous pouvez effectuer vous-même cette réduction comme suit :

- mesure du flux de chaque satellite présent dans le champ en soustrayant le fond du ciel de chaque mesure (d'abord les satellites séparément comme observé, ensuite les satellites pendant l'événement);
- utiliser le satellite de référence pour éliminer l'absorption en divisant le flux des satellites observés par celui du satellite de référence.

Une note technique Phemu est disponible pour vous aider à la réduction :

https://www.imcce.fr/content/medias/recherche/campagnes-observations/phemu15/notes_tech/note05-fr.pdf

Votre courbe de lumière est maintenant prête à être envoyée pour une analyse globale.

Envoi de votre observation

Un site est prévu pour que vous téléchargiez votre observation :

<http://www.sai.msu.ru/neb/nss/phemuobsai.htm>

Vous pouvez aussi envoyer votre enregistrement brut (même des images en format fits) accompagné d'un rapport indispensable pour une analyse de vos données utilisant la fiche d'observation à

<https://www.imcce.fr/content/medias/recherche/campagnes-observations/phemu15/fiche-obs-phemu-v4-fr.txt>



THÈME: LES MARÉES

1.



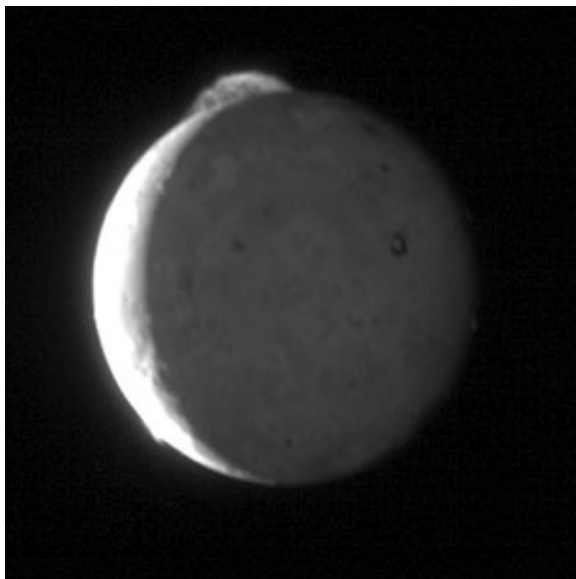
Calendrier des marées

maree.info

Mars 2015			Mars 2021		
01 D Aubin	46	51	01 L Aubin	106	106
02 L Charles le Bon	57	62	02 M Charles le Bon	105	102
03 M Guénolé	67	72	03 M Guénolé	98	93
04 M Casimir	76	79	04 J Casimir	87	79
05 J Olive	82	85	05 V Olive	71	63
06 V Colette	86	88	06 S Colette	55	49
07 S Félicité	88	88	07 D Félicité	44	
08 D Jean de Dieu	87	86	08 L Jean de Dieu	42	43
09 L Françoise	84	81	09 M Françoise	48	54
10 M Vivien	78	74	10 M Vivien	60	67
11 M Rosine	70	65	11 J Rosine	72	78
12 J Justine	60	55	12 V Justine	83	86
13 V Rodrigue	50	45	13 S Rodrigue	89	91
14 S Mathilde	42	41	14 D Mathilde	92	92
15 D Louise	42		15 L Louise	92	90
16 L Bénédicte	46	53	16 M Bénédicte	88	85
17 M Patrice	61	71	17 M Patrice	82	77
18 M Cyrille	80	89	18 J Cyrille	72	67
19 J Joseph	97	105	19 V Joseph	61	55
20 V Printemps	110	115	20 S Printemps	49	43
21 S Clémence	118	119	21 D Clémence	37	32
22 D Léa	118	119	22 L Léa	28	28
23 L Victorien	111	105	23 M Victorien	28	
24 M Catherine	98	90	24 M Catherine	33	40
25 M Annonciation	82	73	25 J Annonciation	48	56
26 J Larissa	64	55	26 V Larissa	65	74
27 V Habib	48	42	27 S Habib	62	90
28 S Gontran	38		28 D Gontran	97	103
29 D Gwladys	36	38	29 L Gwladys	107	111
30 L Amédée	41	48	30 M Amédée	112	112
31 M Benjamin	52	57	31 M Benjamin	111	107

2.

3.



4.

1. Le même paysage de Bretagne photographié à 6 heures d'intervalle. Le marnage (différence de hauteur entre la basse mer et la pleine mer) peut atteindre 7 m à Brest ou même 15 m au Mont-St-Michel.

2. Le coefficient de marée peut varier de 20 à 120. En mars 2015, il atteignait quasiment son maximum, 119 le 21 mars, lendemain de l'équinoxe. La nouvelle Lune avait eu lieu le 20 mars et le périgée le 19 mars avec une distance de 357 600 km. Six ans plus tard, le coefficient n'est que de 26 le 22 mars, un des plus faibles possibles ! Il faut préciser que la Lune était en premier quartier le 21 et à l'apogée le 18. Il faudra attendre plus d'une semaine après l'équinoxe pour trouver des coefficients supérieurs à 100. Voir pages 10-14 (images provenant de <http://maree.info/82/calendrier>).

3. Panache géant du volcan Tvashtar de Io, photographié par la sonde New Horizons en 2007. Ce volcanisme provient des effets de marée dus à Jupiter. Voir pages 20-23. Cette image est extraite d'une animation de 5 images visibles sur <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA09665>.

4. Galaxies des Antennes photographiées par le Hubble Space Telescope. Cette paire de galaxies est déformée par effet de marée. Voir pages 29-33. (crédit ESA/Hubble & NASA).

Les marées, notions de base

Pierre Causeret

C'est un phénomène que connaissent bien tous les habitants des côtes de l'Atlantique ou de la Manche. On peut observer en moyenne deux marées hautes (ou pleines mers) par jour et chaque mois deux périodes de marées plus importantes dites de vives-eaux ou grandes marées. Mais les explications ne sont pas si simples. Il suffit pour s'en convaincre de parcourir les sites ou les livres qui en parlent.

Les principales erreurs rencontrées

« Dès que la Lune se trouve près d'un océan, le niveau de l'eau monte, c'est la marée haute. Puis dès qu'elle s'éloigne, l'eau redescend, c'est la marée basse » [1]. Ce type d'explication correspond à la figure 1 ; il ne peut justifier qu'une seule marée haute par jour.

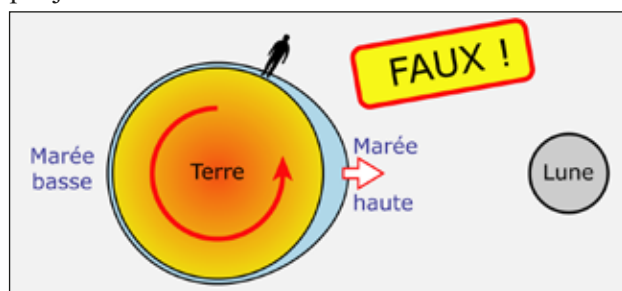


Fig.1. Une explication fautive des marées assez répandue. Dans ce modèle, lorsque la Terre tourne sur elle-même, le personnage ne rencontre qu'une seule marée basse et une seule marée haute par jour.

Pour trouver une deuxième marée haute dans la journée, certains vont chercher une deuxième explication, la force centrifuge. Une des marées hautes serait due à l'attraction de la Lune et l'autre à la force centrifuge. Ce type d'explication est confuse, les deux marées hautes provenant en réalité d'un même phénomène. Et c'est encore plus faux quand on attribue cette force centrifuge à la rotation de la Terre sur elle-même ou même à la révolution de la Terre autour du Soleil comme on peut le lire parfois.

L'exemple des étoiles doubles

Avant de parler des marées sur Terre, intéressons-nous aux forces de marée entre deux étoiles de taille comparable. On n'en a pas d'observation directe mais c'est sans doute le cas le plus simple à expliquer.

Imaginons deux étoiles E_1 et E_2 proches l'une de l'autre. On sait depuis Newton qu'elles s'attirent et que la force d'attraction est proportionnelle à leur

masse et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Plus elles sont proches, plus elles s'attirent. Comme une étoile a une certaine dimension, toutes les parties de l'étoile E_1 ne sont pas à la même distance de l'étoile E_2 . Les parties les plus proches sont davantage attirées que les parties plus éloignées (figure 2). Du coup, l'étoile E_1 va tomber sur l'étoile E_2 en se déformant, en s'allongeant du côté de A ainsi qu'à l'opposé.

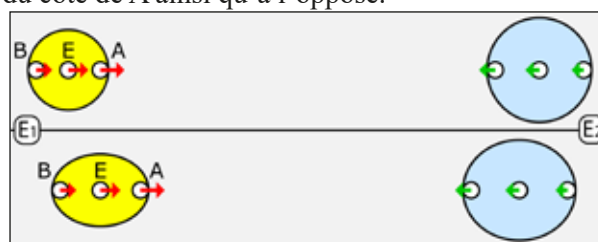


Fig.2. Chute de l'étoile jaune sur l'étoile bleue. On a représenté en rouge les forces d'attraction. La partie A de l'étoile jaune étant plus proche de l'étoile bleue que la partie B, elle va tomber plus vite vers celle-ci et l'étoile va se déformer. De la même manière, l'étoile bleue va tomber sur l'étoile jaune en se déformant.

On parle de force de marée ou d'attraction différentielle. Ce qui déforme l'étoile jaune, c'est la différence d'attraction entre les différentes parties de l'étoile en fonction de leur distance à l'étoile bleue.

Cette explication est tout à fait correcte et c'est la plus simple. Seul problème, elle ne va pas durer longtemps puisque les deux étoiles vont finir par se rencontrer et fusionner. Pour remédier à cette difficulté, il suffit de faire tourner les étoiles l'une autour de l'autre ou plus précisément autour de ce qu'on appelle leur centre de masse (figure 3).

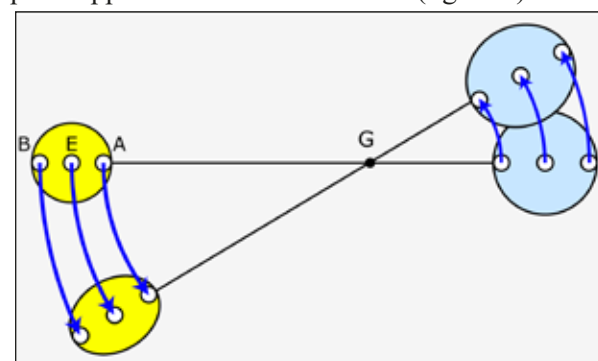


Fig.3. Marées entre deux étoiles tournant autour de leur centre de masse G. La partie A de l'étoile jaune étant plus proche de l'étoile bleue que B, elle est davantage attirée et l'étoile jaune va s'allonger. L'étoile bleue se déforme aussi mais moins, l'étoile jaune étant moins massive que la bleue.

Calcul de la force de marée

On appelle r le rayon de l'étoile jaune, d la distance entre les centres des deux étoiles, m_E la masse de l'étoile bleue et m la masse de la partie A ou B.

Distance du point A au centre de l'étoile bleue : $d-r$

Force d'attraction de cette étoile sur A : $F_A = G \frac{m \times m_E}{(d-r)^2}$

Distance du point B au centre de l'étoile bleue : $d+r$

Force d'attraction de cette étoile sur B : $F_B = G \frac{m \times m_E}{(d+r)^2}$

Force de marée : $F_A - F_B = G \frac{m \times m_E}{(d-r)^2} - G \frac{m \times m_E}{(d+r)^2}$

$$F_A - F_B = G \times m \times m_E \times \left(\frac{(d+r)^2 - (d-r)^2}{(d-r)^2 (d+r)^2} \right)$$

$$F_A - F_B = G \times m \times m_E \times \left(\frac{4dr}{d^4 - 2d^2r^2 + r^4} \right)$$

Si r est petit devant d , ce qui est le cas habituellement, le dénominateur est approximativement égal à d^4 .

On obtient alors :

$$F_A - F_B \approx G \times m \times m_E \times \left(\frac{4dr}{d^4} \right) \text{ soit } G \times m \times m_E \times \left(\frac{4r}{d^3} \right)$$

La force de marée de l'étoile bleue sur l'étoile jaune est donc proportionnelle au rayon de l'étoile jaune et inversement proportionnelle au cube de la distance entre les deux étoiles.

Le cas de la Terre et de la Lune

Les explications précédentes pour deux étoiles sont toujours valables dans le cas du système Terre-Lune. En effet, on dit parfois que la Lune tourne autour de la Terre mais il serait plus correct de dire que Terre et Lune tournent autour de leur centre de masse commun comme les deux étoiles de la figure 3. Mais le schéma est plus délicat à faire car le centre de masse du système se trouve à l'intérieur de la Terre à environ 1 700 km sous la surface.

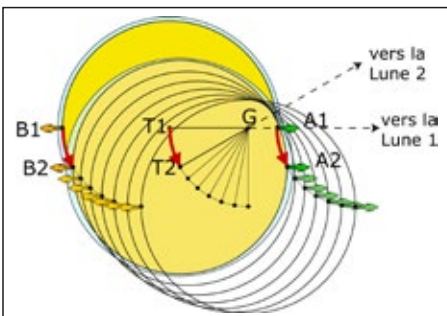


Fig.4. G est le centre de masse du système Terre-Lune. A et B sont deux parties de la Terre situées l'une du côté de la Lune, l'autre à l'opposé.

Sur la figure 4 nous supposons que la Terre ne tourne pas sur elle-même. En environ un mois, le centre T de la Terre décrit un cercle autour de G et tous les points de la Terre sont en translation circulaire. Au cours de ce mouvement, T passe de $T1$ à $T2$, le personnage de droite de $A1$ à $A2$ et le personnage de gauche de $B1$ à $B2$. Le point A étant plus proche de la Lune, il est davantage attiré que T et T est plus attiré que B qui

est plus éloigné, ce qui va créer deux bourrelets de marée.

Si maintenant nous considérons la rotation de la Terre sur elle-même, on obtient bien deux marées hautes par jour (figure 5).

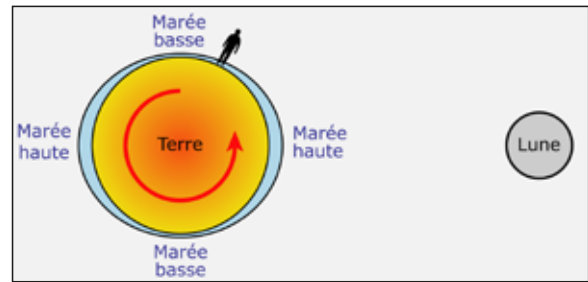


Fig.5. On considère maintenant la rotation de la Terre sur elle-même. Les bourrelets de marée restent toujours ici (dans ce modèle simplifié) alignés avec la Lune. Le personnage va rencontrer deux marées basses et deux marées hautes par jour.

On s'est placé dans un référentiel dit galiléen, fixe par rapport aux étoiles. Mais il existe une autre manière d'aborder les marées sur Terre : de nombreux ouvrages se placent dans un référentiel géocentrique dont l'origine est le centre de la Terre et dont les axes pointent vers des étoiles fixes. Mais comme la Terre tourne autour du centre de masse du système Terre-Lune, nous ne sommes plus dans un repère galiléen. On voit alors apparaître des pseudo-forces ou forces d'inertie appelées forces centrifuges (et que n'aiment pas certains physiciens).

Dans un tel repère, le centre de la Terre est soumis d'une part à la force d'attraction de la Lune et d'autre part à la force centrifuge due au mouvement de la Terre autour du centre de masse du système Terre-Lune. Ces deux forces s'équilibrent. Comme on peut le voir sur la figure 4 (où l'on avait supprimé la rotation de la Terre sur elle-même), les points A et B sont soumis au même mouvement que T , ils subiront donc la même force centrifuge dans le référentiel géocentrique. Mais du côté de A , plus proche de la Lune que T , la force d'attraction de la Lune sera supérieure, donc plus importante que la force centrifuge alors que du côté de B , plus éloigné de la Lune, ce sera l'inverse (figure 6).

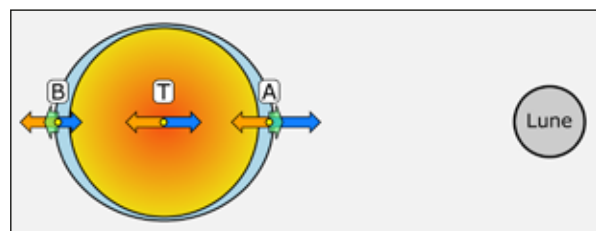


Fig.6. Les marées dans un référentiel géocentrique. En orange, la pseudo-force centrifuge, identique en tout point de la Terre (nous faisons toujours abstraction de la rotation de la Terre sur elle-même). En bleu, la force d'attraction de la Lune sur différentes parties de la Terre. En vert, la résultante de ces deux forces.

Dans cette approche géocentrique, la force de marée est toujours une force d'attraction différentielle (différence d'attraction entre A et T ou entre B et T).

Il est intéressant de rechercher cette force de marée en d'autres points de la surface de la Terre. Cette fois, il faut ajouter force d'attraction et force d'inertie centrifuge sous forme vectorielle.

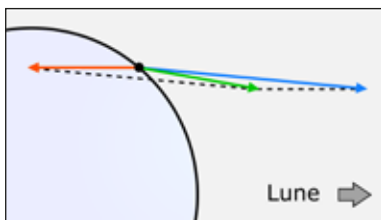


Fig.7. Force de marée en un point. En bleu, la force d'attraction de la Lune, en orange, la force d'inertie centrifuge et en vert, la somme des deux vecteurs.

Si on représente les forces de marée sur l'ensemble de la surface de la Terre, on obtient la figure 8.

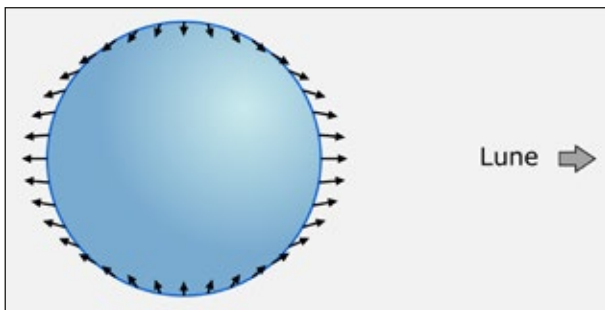


Fig.8. Les forces de marée à la surface de la Terre.

On remarque que la force de marée peut aussi avoir une composante horizontale. Celle-ci est particulièrement importante pour le déplacement des masses d'eau.

La période de la marée

La figure 5 nous montrait deux marées hautes en 24 h soit une période de 12 h. Or, ce n'est pas ce que l'on observe. La raison en est simple : pendant que la Terre effectue un tour sur elle-même, la Lune s'est déplacée sur son orbite. De ce fait, l'intervalle de temps moyen entre deux pleines mers est de 12 h 25 min (figure 9).

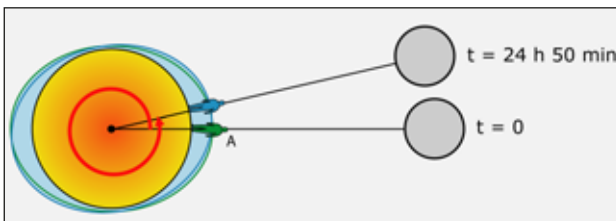


Fig.9. Pour l'observateur en A, la marée est haute, il voit la Lune au méridien. Il faut attendre 24 h et 50 min pour que l'observateur retrouve la Lune au méridien, celle-ci s'étant déplacée d'environ 13° autour de la Terre. Comme il y a aussi une marée haute quand la Lune est à l'« antiméridien », cela donne un intervalle moyen de 12 h 25 min entre deux pleines mers.

Calcul du décalage de 50 min par jour

Pendant que la Terre tourne sur elle-même, la Lune tourne autour de la Terre. On cherche après combien de temps on retrouve un passage de la Lune au méridien pour un habitant de la Terre. Il s'agit d'un problème de période synodique classique, composition de deux mouvements périodiques, que l'on peut résoudre simplement en calculant des vitesses angulaires.

Période sidérale de révolution de la Lune : 27,3216 jours.

Vitesse angulaire sidérale de la Lune autour de la Terre : $360^\circ / 27,3216 \text{ j}$ soit $13,2^\circ/\text{j}$

Période sidérale de rotation de la Terre : 23 h 56 min soit 0,9972 jours

Vitesse angulaire sidérale de la Terre : $360^\circ / 0,9972 \text{ j}$ soit $361^\circ/\text{j}$

On peut trouver la vitesse angulaire de rotation de la Terre par rapport à l'axe Terre - Lune en soustrayant les deux vitesses angulaires précédentes (les deux tournent dans le même sens) : $361^\circ/\text{j} - 13,2^\circ/\text{j} = 347,8^\circ/\text{j}$.

Si un point de la surface terrestre se trouve sur l'axe Terre - Lune à un instant 0, il se retrouvera sur cet axe après avoir parcouru 360° toujours par rapport à cet axe. $347,8^\circ$ en 1 jour $\rightarrow 360^\circ$ en $360/347,8 \text{ j}$ soit 1,035 j ou encore 1 jour et 50 minutes.

Le rôle du Soleil

La Terre est davantage attirée par le Soleil que par la Lune mais les forces de marées dues à la Lune sont 2,2 fois plus importantes que celles dues au Soleil, grâce à sa proximité (voir encadré). C'est bien la Lune le premier responsable des marées, le Soleil ayant néanmoins une influence non négligeable. On lit parfois que, sans la Lune, il n'y aurait pas de marées. C'est faux, il y aurait des marées mais moins importantes, uniquement dues au Soleil, comparables aux marées de mortes-eaux actuelles.

Qui attire le plus la Terre, le Soleil ou la Lune ?

En termes de force de gravitation, proportionnelle à la masse m et inversement proportionnelle au carré de la distance d , il faut comparer m/d^2 pour la Lune et pour le Soleil.

$$m_s = 2 \times 10^{30} \text{ kg} ; m_L = 7,35 \times 10^{22} \text{ kg} ;$$

$$d_s = 149,6 \times 10^6 \text{ km} ; d_L = 384\,400 \text{ km}.$$

On obtient 180 fois plus pour le Soleil que pour la Lune : **la Terre est 180 fois plus attirée par le Soleil que par la Lune.**

En terme de force de marée, proportionnelle à la masse m et inversement proportionnelle au cube de la distance d , il faut comparer m/d^3 pour la Lune et pour le Soleil.

On obtient 2,2 fois plus pour la Lune que pour le Soleil : **les forces de marées dues à la Lune sont 2,2 fois plus importantes que celles dues au Soleil.**

Les bourrelets de marées dues au Soleil vont se former sur l'axe Terre-Soleil. On peut comprendre

que les forces de marées de la Lune et du Soleil vont s'ajouter quand Soleil Terre et Lune sont alignés donc en pleine Lune ou en nouvelle Lune. Ce sont les marées de vives-eaux ou grandes marées (figure 10a). À l'inverse, au premier ou au dernier quartier, les forces de marées dues au Soleil vont diminuer les marées dues à la Lune et donner les marées de mortes-eaux (figure 10b).

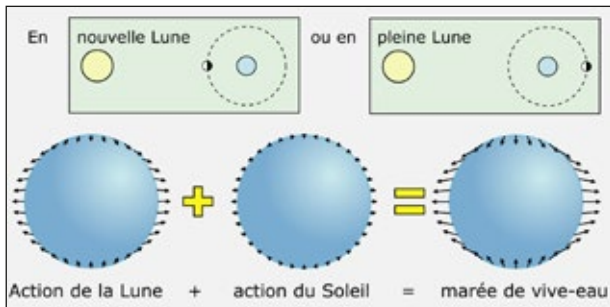


Fig.10a. Quand Soleil, Terre et Lune sont alignés, les forces de marées dues à la Lune et au Soleil vont dans le même sens, les marées sont plus importantes (vives-eaux).

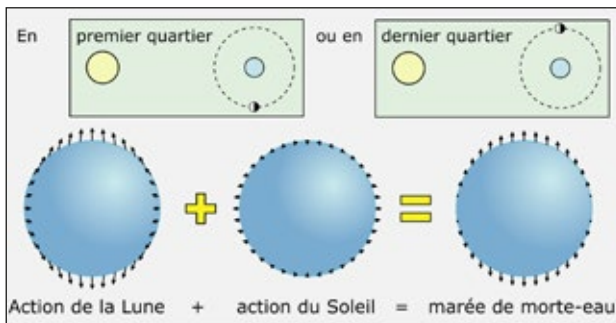


Fig.10b. En premier ou en dernier quartier, les forces de marée dues au Soleil amoindrissent les marées dues à la Lune, les marées sont de plus faible amplitude (mortes-eaux).

Les plus grandes marées

La distance de la Lune

La Lune à l'apogée (au plus loin de la Terre) est à un peu plus de 406 000 km ; au périgée (au plus près de la Terre), elle est à environ 356 000 km. De l'apogée au périgée, les forces de marées augmentent de près de 50 %, ce qui est loin d'être négligeable. Si vous voulez trouver des marées importantes, il faut les chercher aux alentours du périgée de la Lune. De plus, comme la distance de la Lune au périgée n'est pas constante (l'orbite de la Lune se déforme), c'est encore mieux si le périgée est minimal.

Les marées d'équinoxes

On lit parfois que « lors des équinoxes, le Soleil exerce une attraction plus forte sur la Terre que le reste de l'année » [2]. Encore une idée fautive, l'attraction du Soleil est maximale lorsqu'il est au plus près de la Terre, début janvier. Et pourtant, les marées d'équinoxes sont connues pour être les plus importantes de l'année.

Aux équinoxes, le Soleil est dans le plan de l'équateur terrestre, donc la nouvelle Lune ou la pleine Lune aussi. Un schéma permet de comprendre l'origine de l'importance des marées d'équinoxe, en particulier à l'équateur (figure 11a) où le bourrelet est le plus important. C'est moins évident à nos latitudes.

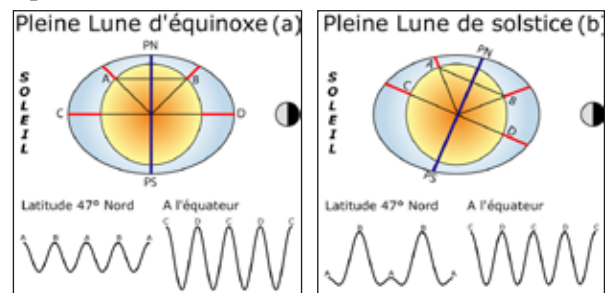


Fig.11. Marées de pleine Lune aux équinoxes et aux solstices. Les courbes en dessous indiquent la hauteur d'eau au cours de la rotation de la Terre dans ce modèle simplifié.

Aux solstices (figure 11b), les marées sont moins importantes à l'équateur. À une latitude de 47° N, on remarque une forte différence entre les deux marées.

Les grandes marées 2021

Trois conditions sont donc nécessaires pour obtenir de très grandes marées :

- nouvelle Lune ou pleine Lune ;
- périgée si possible minimal ;
- équinoxe.

Et c'est encore mieux si la Lune est dans le plan de l'écliptique (proche d'un nœud lunaire).

Si nous cherchons aux alentours de l'équinoxe du 20 mars 2021 :

- nouvelle Lune les 13 mars et 12 avril, pleine Lune le 28 mars ;
- périgée le 2 et le 30 mars.

La période la plus favorable est autour du 28 au 30 mars : le coefficient de marée le plus important de cette période est de 112 le 30 mars.

En septembre-octobre, nous obtenons une situation assez proche début octobre avec un périgée le 8/10 et une nouvelle Lune le 6/10. Le plus fort coefficient sera de 108 le 8/10. Il est moins important qu'en mars mais nous sommes un peu plus loin de l'équinoxe et le périgée est plus éloigné (363 400 km le 8/10 contre 360 300 km le 30/03).

Le coefficient de marée peut varier de 20 à 120. Il est proportionnel au marnage (la variation de hauteur d'eau entre basse mer et pleine mer). Il vaut 100 pour une marée de vive-eau équinoxiale moyenne. Vous trouverez page 19 un graphique montrant les coefficients de marée en 2021.

Les défauts de la théorie statique

Les explications précédentes permettent de comprendre l'origine des marées, mais elles sont loin de refléter la réalité. Nous avons en effet supposé (comme Newton) d'une part qu'un océan recouvrirait l'ensemble de la Terre et d'autre part que les forces déformaient instantanément cet océan, ce qui est loin d'être le cas.

Dans la théorie statique, les pleines mers devraient avoir lieu au moment où la Lune passe dans le plan du méridien, plein sud (aux latitudes de l'Europe), ou à son opposé sous l'horizon plein nord. En réalité, ce n'est pas le cas. Il faut un certain temps pour que l'onde de marée se forme et se propage. Ainsi, à La Rochelle, la marée haute arrive un peu plus de 3 h après le passage de la Lune au méridien. À Roscoff, c'est 5 h, à St-Malo, 6 h, à Cherbourg, près de 8 h, Le Havre, 10 h... L'onde de marée doit remonter la Manche. C'est ce qu'on appelle l'établissement du port (carte page 24).

De la même manière, les marées de vives-eaux n'ont pas lieu le jour de la pleine Lune ou de la nouvelle Lune, mais environ 2 jours plus tard.

Dans la théorie statique, les variations de hauteur d'eau devraient être de l'ordre de 50 cm. Or on observe des marnages de plusieurs mètres sur la côte atlantique, jusqu'à 15 m dans la baie du Mont-Saint-Michel ou même 16 m au Canada, dans la baie de Fundy. Il se trouve que le bassin atlantique a une résonance d'environ 12 h qui amplifie le balancement périodique des masses d'eau. De plus, la forme des côtes et le relief sous marin peuvent amplifier la marée, par exemple lorsque l'onde de marée remonte la Manche et la baie du Mont-St-Michel.

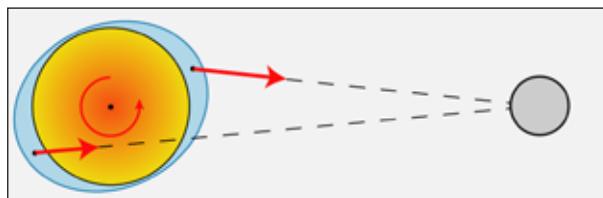
Nous sommes habitués sur les côtes atlantiques à 2 marées par jour à peu près équivalentes, espacées de 12 h 25 min en moyenne. Mais, en fonction de la résonance du bassin, on trouve certaines régions du monde où l'on n'observe qu'une seule marée par jour (sur certaines côtes du Pacifique), d'autres régions avec une forte inégalité diurne entre les deux marées du jour...

La théorie statique ne permet pas de faire des prévisions correctes. On utilise maintenant des modèles où l'on décompose le phénomène en ondes de différentes périodes : ondes semi-diurne M2 (M comme moon) de période 12 h 25 min ou S2 (S comme sun) de période 12 h, ondes diurnes, bimensuelles, mensuelles, semestrielles... On en utilise plus d'une centaine dont les coefficients varient suivant les ports. La marée observée est le résultat de la superposition de toutes ces ondes.

Autres effets des marées

Pour terminer, voici quelques autres effets des marées, abordés très superficiellement.

- Les marées océaniques ralentissent la rotation de la Terre et la durée du jour augmente de près de deux millisecondes par siècle. Le phénomène peut s'expliquer de deux manières : par la perte d'énergie due aux frottements de l'eau sur les fonds océaniques ou par l'attraction de la Lune sur les bourrelets dues aux marées qui ont un certain retard.



- La Terre ralentissant, la Lune s'éloigne de la Terre d'environ 4 cm par an, par conservation du moment cinétique du système Terre-Lune.
- Les effets de marée sont davantage visibles sur les océans car l'eau se déplace facilement. Mais la Lune attire autant les roches que l'eau et il existe également des marées terrestres qui font monter et descendre la croûte terrestre de quelques décimètres deux fois par jour.
- Il existe également des marées atmosphériques d'amplitude très faible en termes de forces de marée, mais amplifiées par les « marées thermiques » (chauffage de l'atmosphère par le Soleil côté jour).
- La Terre exerce également des effets de marée sur la Lune (20 fois plus importants que ceux de la Lune sur la Terre). Ainsi, la rotation de la Lune sur elle-même a ralenti jusqu'à être bloquée le long de l'axe Terre-Lune. La Lune montre ainsi toujours la même face à la Terre. On parle de rotation synchrone. De la même manière, les satellites galiléens de Jupiter montrent toujours la même face à la planète géante.
- Les effets de marée sont présents dans tout l'Univers : rotation synchrone de satellites, limite de Roche (la comète Shoemaker-Levy a été fragmentée lorsqu'elle est passée près de Jupiter en 1992), effet de marée entre deux étoiles, entre deux galaxies... ■

Pour en savoir plus

Tout savoir sur les marées Éd Ouest France (Odile Guérin)

La Lune à portée de main Éd Belin pour la science (Pierre Causeret, Jean-Luc Fouquet, Liliane Sarrazin)

La marée océanique côtière. Institut océanographique (Bernard Simon)

[1] sur <https://www.cnews.fr/racines/2015-01-12/pourquoi-y-t-il-des-marees-hautes-et-des-marees-basses-697737>

[2] <https://www.oceanlock.com/fr/blog/5-pourquoi-les-marees-dequinoux-sont-elles-plus-fortes->

AVEC NOS ÉLÈVES

Les marées à l'école

Jean-Luc Fouquet

L'auteur propose à quelques élèves de mimer corporellement les astres impliqués dans le phénomène des marées : la Terre, la Lune et le Soleil. Deux autres élèves symbolisent des bateaux soumis aux rythmes des marées. Considérant que l'intensité des forces de gravitation varie en fonction de la distance on justifie visuellement cette intensité par des variations de distances. On peut ainsi symboliser les grandes marées, celles de vives-eaux ou des mortes-eaux, s'intéresser aux phases de la Lune et même au décalage de l'horaire de la marée.

Le calcul des marées est complexe et il pourrait paraître bien prétentieux et inutile, au premier abord, d'étudier le phénomène à l'école. Pourtant, l'essentiel peut être expliqué en ne mettant en jeu que la force d'attraction universelle avec les seules actions de la Lune et du Soleil sur notre planète qui est déformable car elle porte sur sa surface des mers, des océans et quelques terres émergées. Pourquoi peut-on observer deux marées hautes par jour ? Pourquoi la mer se retire-t-elle parfois très loin ? Pourquoi l'horaire des marées se décale peu à peu d'un jour à l'autre ? Voilà les questions auxquelles on essaiera de construire collectivement des réponses en impliquant corporellement les élèves dans une ronde, une petite pièce de théâtre jouée par au moins cinq élèves-acteurs, voire davantage si on veut délimiter la scène par des élèves-constellations servant de repères supplémentaires.

Dans la description de ce jeu de rôles, les personnages seront représentés par des figurines « Lego », et désignés de la manière suivante :

Lettre figurant sur le personnage	Nom de l'élève représenté	Rôle joué par cet élève
T	Tom	La Terre
B1	Bob	Un bateau
B2	Béa	Un autre bateau de l'autre côté de la Terre
L	Léa	La Lune
S	Sam	Le Soleil



Fig.1. Les acteurs de la pièce. (Tanguy sera présenté plus tard).

Lorsque ces élèves se déplacent, ils posent successivement le talon du pied déplacé contre la pointe du pied resté immobile comme le suggèrent les dessins ci-dessous :



Fig.2. Déplacement de A à B de 1 pas.



Fig.3. Déplacement de A à B de 3 pas. Ces déplacements serviront à traduire la variation du niveau de l'eau dans le port.

Le rôle de la Lune

La Terre et la Lune s'attirent réciproquement selon la loi de la gravitation universelle établie par Newton au XVII^e siècle. Notre planète bleue est recouverte à 71 % par des mers et des océans, et c'est surtout sur ces immenses étendues d'eau que l'action de la Lune est la plus visible. Cette force d'attraction entre deux corps est d'autant plus intense qu'ils sont plus proches l'un de l'autre. C'est donc ce critère de « distance » que nous allons mettre en évidence dans cette ronde. Les élèves jouant des bateaux nous servent de repères : en s'éloignant du centre de la Terre, et donc de Tom, ils miment l'eau montant dans le port et donc la marée haute.

Dans un premier temps, en l'absence théorique de toute attraction de la Lune ou du Soleil, la Terre et les deux bateaux joués par les trois élèves Tom, Bob et Béa seront rangés, à deux pas de Tom (figure 4).

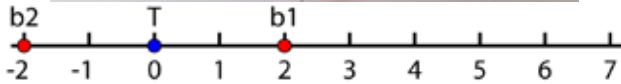
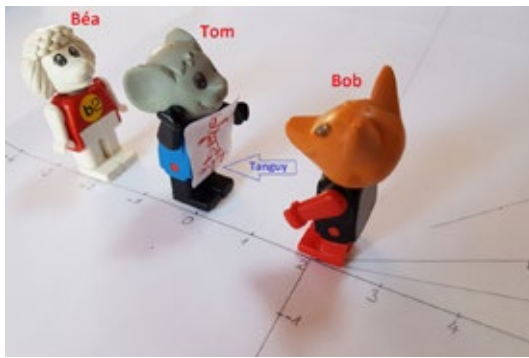


Fig.4. La Terre et les bateaux en l'absence de toute action de la Lune ou du Soleil. On a placé les personnages sur une graduation, -2 pour Béa, 0 pour Tom et 2 pour Bob. Avec une vraie ronde, on espacerait les élèves de deux pas.

Sur la ligne matérialisée par ces trois élèves apparaît la Lune, jouée par Léa (figure 5). Bob, le plus proche d'elle, est le plus attiré par elle et se déplace de trois pas dans sa direction (passant de la position 2 à 5). Tom, un peu plus éloigné d'elle, ne fait que deux pas (passant de la position 0 à 2). Béa, plus loin d'elle encore, doit avoir un déplacement plus faible et ne se déplace que d'un pas passant donc de la position -2 à la position -1.

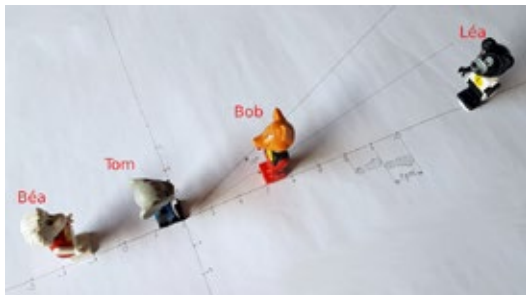


Fig.5. Action de la Lune sur la Terre déformable.

Pour simuler la rotation de notre planète, Tom va alors tourner sur lui-même, dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Pour mieux décrire ce défilement du temps, imaginons la présence d'un habitant de la Terre, que l'on pourrait situer par exemple sur la poitrine de Tom et que l'on pourrait prénommer Tanguy.

Pour plus de clarté, on peut « matérialiser » ce nouveau personnage « théorique » par un petit bonhomme dessiné sur une feuille de papier ou un petit carton tenu par Tom sur sa poitrine. Il y a donc une marée haute chaque fois que celui-ci



Fig.6. Tanguy

fait face à l'un des bateaux qui s'est éloigné. Chaque spectateur de cette ronde se rend bien compte qu'il y a bien deux marées hautes par jour !

Sur la photo précédente, Tom représentant la Terre fait face au bateau B1, et il y a alors pour Tanguy une marée haute. Si maintenant Tom fait un tour complet sur lui-même, Tanguy retrouvera-t-il une marée haute le lendemain à la même heure ? Précisément non, car en 24 heures la Lune, au cours de sa rotation autour de la Terre, s'est déplacée d'un angle de 13° par rapport aux étoiles. Pour mimer cette nouvelle situation, Léa se déplace un peu, dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, et les deux bateaux Bob et Béa s'alignent avec Tom et Léa, tout en gardant leurs distances (figure 7). Ce déplacement de la Lune de 13° correspond à un décalage dans le temps de 50 minutes. Tanguy pourra observer un retard de 25 minutes sur chaque marée haute par rapport à la précédente.



Fig.7. Effet du déplacement journalier de la Lune sur les heures des marées

Le bateau B1 représenté par Bob est amarré dans le port habité par Tanguy et il doit, en toute rigueur, tourner avec Tom dans sa rotation pour décrire ce qui se passe en un jour. Les deux bateaux s'éloignent ou se rapprochent de lui suivant qu'ils se situent sur la ligne Terre-Lune ou sur une direction perpendiculaire, mimant ainsi l'alternance, toutes les 6 heures environ, d'une marée haute et d'une marée basse (figures 8 page suivante).

Le rôle du Soleil

On peut montrer que le Soleil participe au phénomène des marées pour la moitié de la Lune. Cette force de marée due au Soleil s'ajoute à celle due à la Lune lorsque que les trois astres sont alignés, c'est à dire lorsque que la Lune est pleine ou nouvelle. On observe ces jours-là des grandes marées dites de vives-eaux. Au contraire, les actions de la Lune et du Soleil se contrarient les jours de premier ou de dernier quartier. Ce sont alors des mortes-eaux (figures 9).



Fig.8. Successions de marées hautes et basses sur un jour.

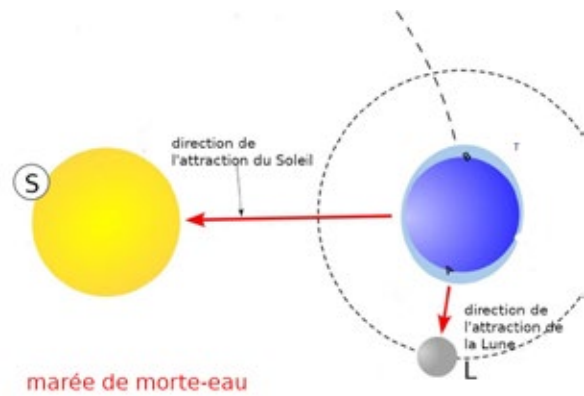


Fig.9a. Schéma des marées au premier quartier.

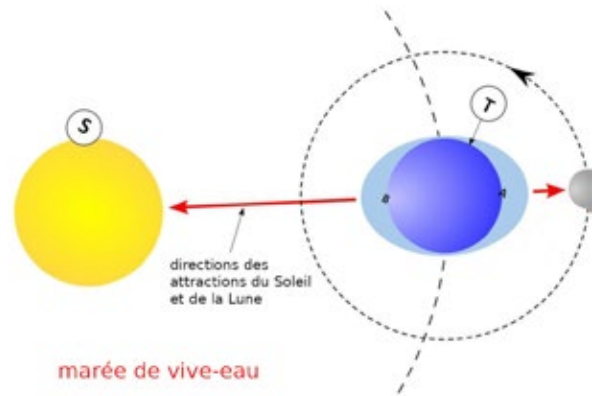


Fig.9b. Schéma des marées à la pleine Lune.

Dans la ronde, Sam, représentant le Soleil, vient se placer sur la ligne Terre-Lune, au-delà de Léa (figure 10). Aussitôt, pour traduire l'action de ce nouveau venu, Bob fait un pas et demi supplémentaire vers lui (passant de la position 5 à 6,5), la Terre fait un petit écart d'un pas dans cette même direction (passant de la position 2 à 3) et Béa avance vers Léa d'un demi-pas. Les bateaux s'écartent encore davantage de la Terre, et au cours de la rotation de Tom sur lui-même, on peut constater que pour Tanguy, il y a bien deux marées de vives-eaux par jour. Léa se situant entre Tom et Sam symbolise une nouvelle Lune.

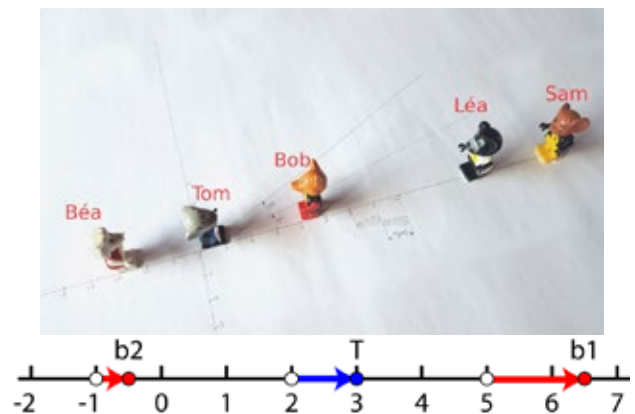


Fig.10. Actions conjuguées de la Lune et du Soleil en nouvelle Lune (les flèches indiquent les déplacements par rapport à la figure 5 où seule l'action de la Lune était prise en compte).

La situation représentée sur la figure 11 est celle du dernier quartier de Lune dont l'action sur les océans est contrariée par celle du Soleil situé dans une direction perpendiculaire. L'écart entre la Terre et les deux bateaux devient plus faible, Bob et Béa se rapprochent de Tom mimant ainsi des marées de faible amplitude, dites marées de mortes-eaux. Nous pourrions faire les mêmes observations si les acteurs de cette ronde jouaient le phénomène au premier quartier.

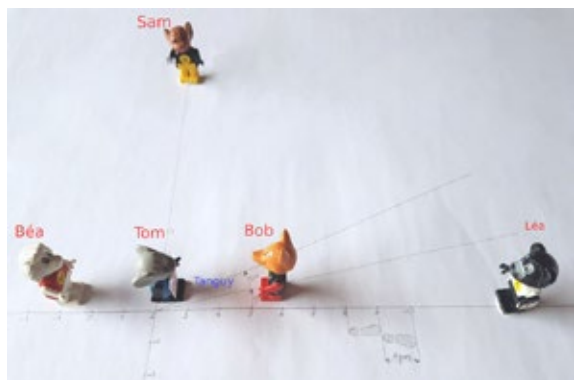


Fig.11. Actions contrariées de la Lune et du Soleil au dernier quartier.

En exercice

On pourrait demander aux élèves de mimer la situation de pleine Lune, Sam et Léa étant pour cela alignés avec Tom de part et d'autre de lui (figure 12).

En partant des positions occupées par chaque élève sur la figure 5, l'action du Soleil étant moitié moindre que celle de la Lune, Sam attire Béa qui fait un pas et demi vers lui (occupant désormais la position $-2,5$), Tom fait vers lui un pas (revenant à la position 1) et Bob revient avec un demi-pas à la position 4,5. On peut alors observer des grandes marées, les écarts entre la Terre et les deux bateaux étant les mêmes que sur la figure 10 (soit 3,5 pas).

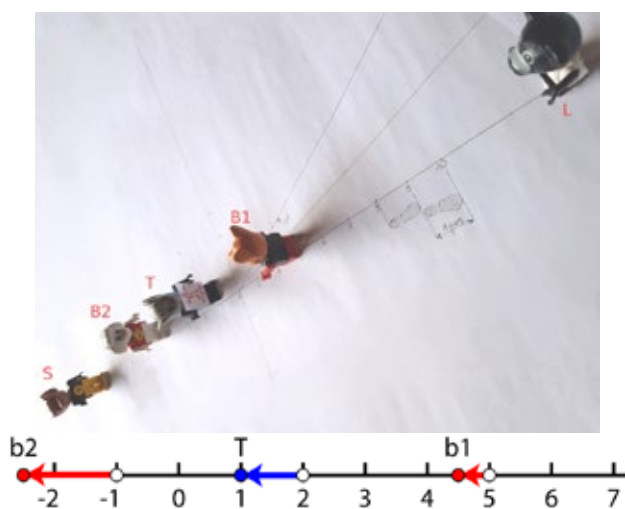


Fig.12. Les acteurs un jour de pleine Lune (les déplacements sont indiqués par rapport à la figure 5).

Le rôle de Tanguy

Choisir un point particulier sur la Terre permet d'introduire dans cette ronde la notion de temps, de préciser approximativement à quelle heure on peut observer une marée haute ou basse en fonction de l'aspect de la Lune¹. Retrouvons Tanguy (voir figure 6) étendu dans un champ près de chez lui. Tom tient le carton avec Tanguy sur sa poitrine et lorsqu'il fait face à Sam, on peut dire que pour Tanguy, c'est le milieu de la journée, le Soleil est au plus haut au-dessus de son terrain, il est alors midi pour lui.

Si Tom fait un quart de tour sur lui-même dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, le Soleil se trouve alors dans le plan du petit carton et se couche, c'est le début de la soirée pour Tanguy.

Tom poursuit sa rotation d'un demi tour dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et fait maintenant face à Bob et à Léa (figure 13).

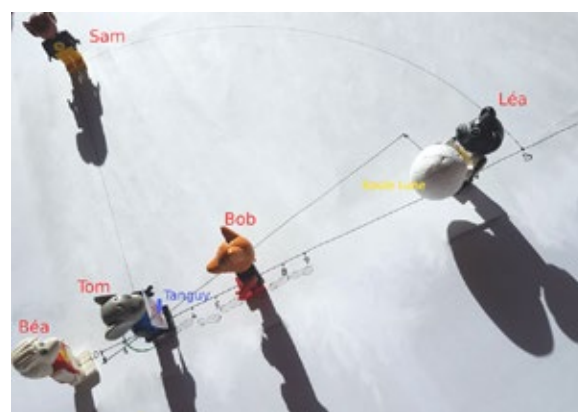


Fig.13. Marée haute à 6 h.

Pour Tanguy, c'est marée haute, mais de faible coefficient car Lune et Soleil sont dans deux directions perpendiculaires. Tom voit sur la boule-Lune en polystyrène un dernier quartier. Sam, le Soleil, est dans le prolongement du champ de Tanguy, il se lève, il est 6 heures du matin.

Sur la figure 14, Tom a fait un quart de tour sur lui-même par rapport à la situation de la figure 13, entraînant dans sa rotation les deux bateaux. Six heures se sont écoulées et pour Tanguy qui fait désormais face à Sam, il voit le Soleil au plus haut au-dessus de son terrain, il est midi. C'est marée basse et la mer s'est retirée pas trop loin car c'est une marée de morte-eau. La Lune en dernier quartier, dans le prolongement du champ de Tanguy, se couche.

¹ On supposera ici que les forces de marées agissent instantanément. En réalité, il y a toujours un certain retard appelé établissement de port, qui vaut un peu plus de 3 h sur la côte atlantique et davantage le long de la Manche.



Fig.14. Marée basse à 12 h.

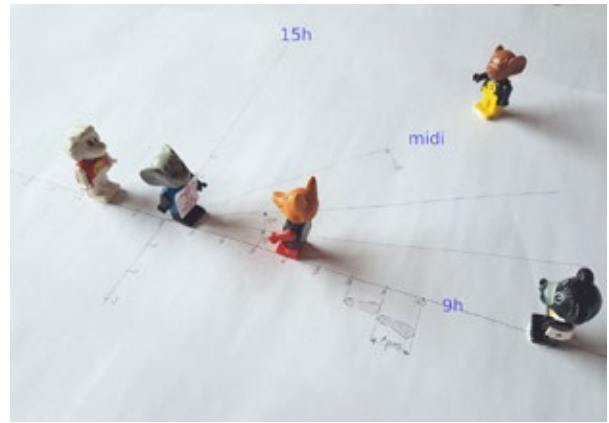


Fig.15. Photo 1 de l'exercice.

Le rôle du « vrai Soleil »

Les deux dernières photos ont été prises à l'extérieur avec, dans le dos de Sam, un vrai Soleil éclairant les petits personnages, dans la situation d'une marée haute pour Tanguy, un jour de dernier quartier pour la Lune. C'est une incitation à organiser avec les élèves cette ronde dans la cour de l'école un jour de beau temps, quand le Soleil n'est pas trop haut. Il suffirait alors à Léa de tenir devant elle un ballon ou une grosse boule de polystyrène blanche qui serait alors éclairée par ce vrai Soleil, ce qui apporterait un supplément d'explication pour tous les participants qui pourraient deviner facilement l'aspect de la Lune perçu par les habitants de la Terre, en fonction des positions respectives occupées par Tom, par Léa et par Sam.

Ai-je bien compris ?

Il pourrait être amusant et instructif de revenir sur toutes les notions introduites dans cette ronde et de proposer à de nouveaux acteurs de mimer une situation en imposant une phase de Lune, un état de la marée haute ou basse et pour Tanguy une heure d'observation. Pour illustrer l'exercice, essayons de décrire la situation sur deux photos.

Quel est le point de vue de Tanguy pour ce qui est de l'heure d'observation et de l'état de la marée, pour chacune des deux photos suivantes ?

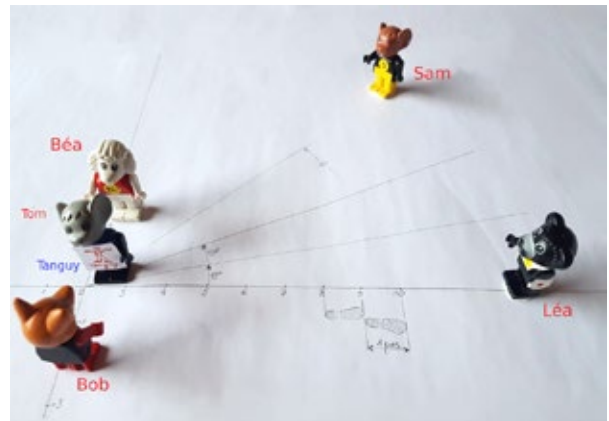
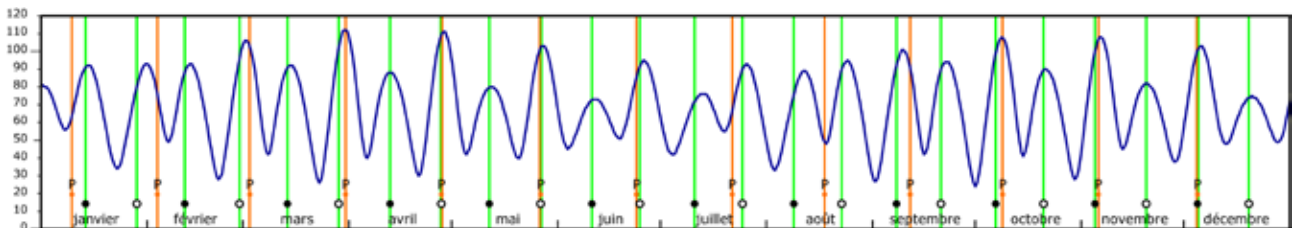


Fig.16. Photo 2 de l'exercice.

Solutions

Sur la première photo, les directions Terre-Lune et Terre-Soleil font entre elles un angle de 45° environ et Tom devra faire une rotation de 3 heures (3 fois 15°) pour se retrouver face à Sam. Donc pour Tanguy, il est 9 heures, la Lune est au plus haut, c'est un dernier croissant. La marée est haute avec un coefficient moyen.

La deuxième photo représente la même scène que la photo précédente pour les positions de la Lune et du Soleil mais 6 heures plus tôt. Pour Tanguy, il est donc 3 heures du matin, la Lune se lève, dans le prolongement de son terrain. C'est marée basse. ■



Les coefficients de marée en 2021. On a indiqué également les dates de pleine Lune et nouvelle Lune (traits verts) ainsi que des périgées (en P, traits oranges). On peut remarquer que les maxima ont tous lieu juste après un trait vert (nouvelle Lune ou pleine Lune) et ils sont d'autant plus importants qu'on est proche du périgée (traits oranges). Les plus grands coefficients sont atteints aux alentours des équinoxes.

Les marées au sein des systèmes de planètes géantes

Valéry Lainey, IMCCE, Observatoire de Paris, PSL

L'influence des forces gravitationnelles de marées varie fortement en fonction des distances et des masses. Une planète géante comme Jupiter, dont la masse est environ mille fois celle de la Terre, induit sur ses lunes des effets puissants qu'il est difficile d'imaginer. Cet article en rend compte de manière précise.

À première vue, les effets de marées au sein des systèmes de planètes géantes ne sont guère différents de ceux agissant sur la Terre et la Lune. Comme la Lune sur la Terre, les lunes des planètes géantes exercent une attraction plus forte sur la partie de leur planète leur faisant face que sur celle opposée. En résulte alors une infime déformation de la planète en ballon de rugby, avec laquelle les diverses lunes vont pouvoir interagir. Ce qui rend les effets de marées intéressants tient au fait que la planète met un certain temps à répondre à l'attraction qu'elle reçoit. Il en résulte deux conséquences cruciales pour l'évolution du système. D'une part, l'intérieur de la planète s'échauffe suite à la friction engendrée. D'autre part, les bourrelets de marées se trouvent en léger décalage par rapport à la lune qui les crée, induisant à leur tour un mouvement bien particulier sur la trajectoire de celle-ci. La réciproque est naturellement vraie. Les lunes subissent le même processus sous l'action gravitationnelle de leur planète.

Io, un satellite au volcanisme incessant

Puisque les effets de marées chauffent l'intérieur des objets, où part donc cette chaleur ? Et bien elle est évacuée à la surface. Sur Terre, la chaleur engendrée par les marées lunaires et solaires est bien inférieure à celle libérée par la désintégration des éléments radioactifs dans la croûte et le manteau terrestre. Il en va tout autrement du satellite Io, satellite le plus proche de Jupiter parmi les quatre gros satellites dits galiléens (car découverts par Galilée en 1610). Les mouvements périodiques de marées à la surface de Io atteignant la centaine de mètres d'élévation, une formidable chaleur est ainsi produite à l'intérieur de cette lune. Une telle chaleur doit être évacuée coûte que coûte, quitte à transformer la surface de ce satellite en un enfer volcanique, en perpétuelle activité.

Il est à noter que la distance Io-Jupiter est quasi similaire à celle séparant la Terre de la Lune. La différence fondamentale ici est que Jupiter est environ mille fois plus massive que la Terre, produisant ainsi une force de marées sur Io absolument titanesque.

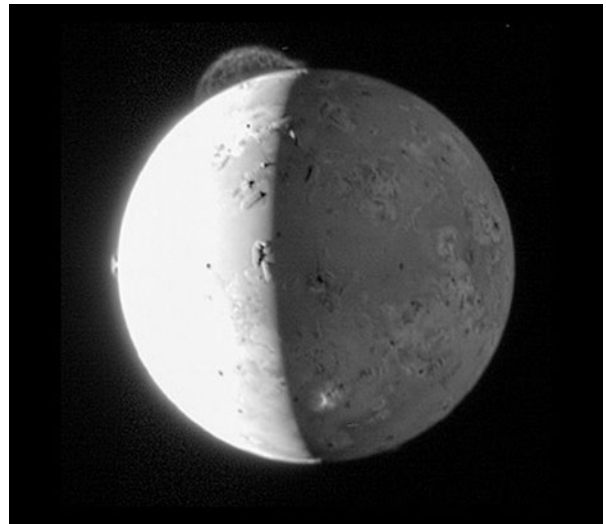


Fig.1. Une image de Io prise par la sonde New Horizons en 2007, lors de sa rencontre avec le système jovien. On y voit clairement un jet de matière s'élevant à plusieurs centaines de kilomètres de hauteur. Il s'agit essentiellement de composés soufrés, ici projetés en l'air à partir du volcan Tvashtar.

Se pourrait-il que les autres satellites galiléens subissent une activité semblable ? La distance augmentant, les lunes suivantes (par ordre de distance croissante Europe, Ganymède et Callisto) ne présentent pas d'activité volcanique. D'ailleurs leur densité plus faible reflète bien la grande quantité de glace d'eau visible à la surface de ces derniers. Toutefois, les effets de marées levées par Jupiter restent assez forts pour maintenir la présence d'un océan d'eau liquide, sous toute la surface gelée du satellite Europe. Il est possible que Ganymède (voire, même si cela semble moins probable, Callisto) puisse accueillir en son sein un océan d'eau liquide similaire.

Encelade, simple lune de glace ?

Les effets de marées sont d'autant plus forts que les objets concernés sont grands. Les satellites galiléens étant de gros objets (Ganymède est plus grand que Mercure), les marées qu'ils subissent sont donc, nous l'avons vu, conséquentes. En revanche, on s'attendrait à un chauffage négligeable pour des objets dix fois plus petits. Le système de Saturne nous révèle pourtant quelques surprises.

À la différence du système de Jupiter, Saturne ne compte qu'un seul gros satellite, Titan. Celui-ci se situe toutefois à plus d'un million de kilomètres de sa planète, laissant la place à une myriade de satellites plus petits. Constitués essentiellement de glace d'eau, ces petites lunes ont une taille variant typiquement de quelques dizaines de kilomètres à plusieurs centaines de kilomètres de rayon. Parmi celles-ci, le satellite Encelade apparaît comme une lune très modeste, son rayon étant d'environ 250 kilomètres.

Quelle ne fut donc pas la surprise lorsqu'en 2005, la sonde Cassini, arrivée en orbite peu de temps plus tôt, devait découvrir des geysers en pleine activité au pôle Sud d'Encelade. Un objet perdant d'autant plus vite sa chaleur interne qu'il est petit, la présence actuelle d'eau liquide sous le pôle Sud apparaissait stupéfiante. Une dizaine d'années plus tard, en 2016, des travaux menés à l'Université de Cornell (USA) devaient montrer que c'est un véritable océan global d'eau liquide qui se cache sous toute la surface d'Encelade. Là encore, des études devaient montrer que le mécanisme responsable d'une production de chaleur suffisante pour maintenir liquide cet océan global était bien les marées levées par Saturne sur Encelade.

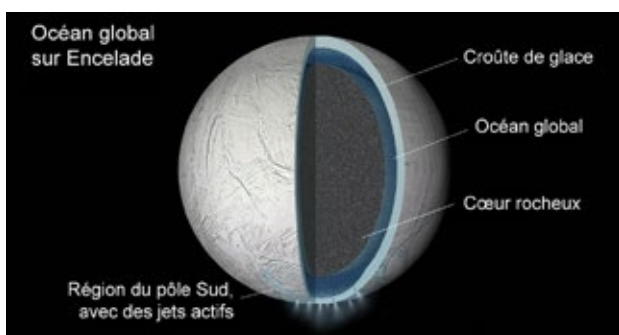


Fig.2. Représentation de l'intérieur du satellite de Saturne, Encelade. Son cœur de silicates est entouré d'un immense océan d'eau recouvrant toute sa surface, lui-même revêtu d'une coquille de glace. La surface présente de nombreuses striures, conséquences d'une action conjointe des effets de marées levées par Saturne et de la remontée d'eau à la surface. Les épaisseurs ne sont pas à l'échelle (d'après © Nasa, JPL-Caltech).

Les marées, un acteur majeur de l'évolution des systèmes de satellites

En plus de chauffer les intérieurs, les effets de marées modifient profondément les orbites des lunes. À ce niveau, deux mécanismes entrent en compétition. Les effets de marées dans les lunes tendent à rapprocher ces dernières de leur planète, tout en diminuant l'excentricité de l'orbite. En revanche, les effets de marées dans les planètes ont généralement l'action opposée, à savoir qu'ils augmentent la distance de l'orbite des satellites levant les marées. Si la distance à la planète est un élément important pour l'amplitude de marée, l'excentricité de l'orbite est tout autant cruciale pour induire un effet notable sur les lunes. En effet, la grande majorité des lunes proches de leur planète sont en résonance spin-orbite : tout comme la Lune, elles montrent la même face à leur planète. Il s'agit là d'une autre conséquence des effets de marées. En l'absence d'excentricité orbitale, les marées levées par la planète seraient donc statiques, déformant de façon constante chacune des lunes. Un exemple caractéristique est le système Pluton/Charon, pour lequel les deux objets se font face en permanence. Aucun des deux objets ne produit de chaleur sous l'effet des marées levées par l'autre, et l'orbite des deux objets ne subit pas de variation en conséquence.

La compréhension des phénomènes de marées requiert donc de prendre en compte à la fois les mouvements orbitaux et de rotation des objets considérés. Enfin, une dernière complication provient de la présence de plusieurs lunes en orbite autour de la même planète. Les systèmes de Jupiter et Saturne présentent en particulier de nombreuses lunes dont les fréquences de révolution sont commensurables (i.e. leur rapport peut s'écrire comme le rapport de deux nombres entiers). On parle alors de résonance orbitale. Ainsi, Io effectue deux révolutions autour de Jupiter lorsque Europe en fait une. De même entre Europe et Ganymède. Ce type de configuration arrive également entre les satellites Mimas et Téthys ou encore Encelade et Dioné pour les lunes de Saturne. Loin d'être anodines, ces configurations dynamiques relativement stables ont souvent pour conséquence d'accroître les effets de marées, en augmentant par exemple les excentricités des lunes. À titre d'exemple, Io ne connaîtrait plus de volcanisme aujourd'hui, si son excentricité orbitale n'était pas en permanence maintenue élevée par l'influence gravitationnelle de son proche voisin Europe.

Reste que ces configurations dynamiques résonantes ne sont pas apparues toutes seules. Elles sont au contraire la conséquence d'une migration des lunes au cours du temps. Or c'est précisément sous l'action des marées que les lunes migrent, leur permettant de croiser différentes résonances orbitales, avec dans certains cas un phénomène de capture en résonance. L'observation des configurations orbitales actuelles des lunes est donc riche d'enseignement lorsque l'on souhaite étudier la formation et l'évolution à long terme de ces objets. Il est toutefois difficile de séparer la contribution des marées levées dans la planète à celles levées dans les lunes, puisque les deux effets sont très corrélés. Pour rendre les choses un peu plus complexes encore, il faut savoir que la quantité de friction engendrée dans les intérieurs des objets dépend également de leur structure interne. Et cette structure évolue, entre autres, en fonction... du chauffage de marées.

Quantifier les marées ?

Il est utile de chercher à quantifier l'importance des effets de marées dans un système, afin de mieux comprendre son évolution. Une méthode consiste à quantifier la chaleur évacuée à la surface de l'objet considéré. Cette technique fonctionne assez bien pour Io et Encelade, qui présentent des sources de chaleur localisées importantes. Pour les autres objets, à commencer par les planètes géantes, il faut trouver une autre méthode. Une solution consiste à observer le mouvement orbital des lunes sur un temps suffisamment long pour espérer détecter une variation (très faible) des orbites. Cette méthode s'appuie sur l'astrométrie, une technique d'observation permettant d'obtenir une très grande précision sur la position des objets célestes.

C'est en utilisant plus d'un siècle d'observations des satellites galiléens de Jupiter qu'il a été possible de quantifier la quantité d'énergie dissipée sous forme de chaleur par les marées dans Io et sa planète, Jupiter. Par comparaison avec les mesures de chaleur prise en infrarouge à la surface de Io, il a été possible de montrer que Io était proche de l'équilibre thermique, c'est-à-dire qu'il évacue sa chaleur à la même vitesse qu'il s'en crée dans son intérieur sous l'action des marées joviennes.

Une méthode similaire a été tentée avec succès pour le système de Saturne, dans le cadre de la mission Cassini. À la différence du système jovien, les résultats astrométriques ont été assez surprenants, avec des expansions orbitales importantes des lunes. Il aura fallu attendre la fin de la mission Cassini, et l'utilisation des données de radio-science, obtenues

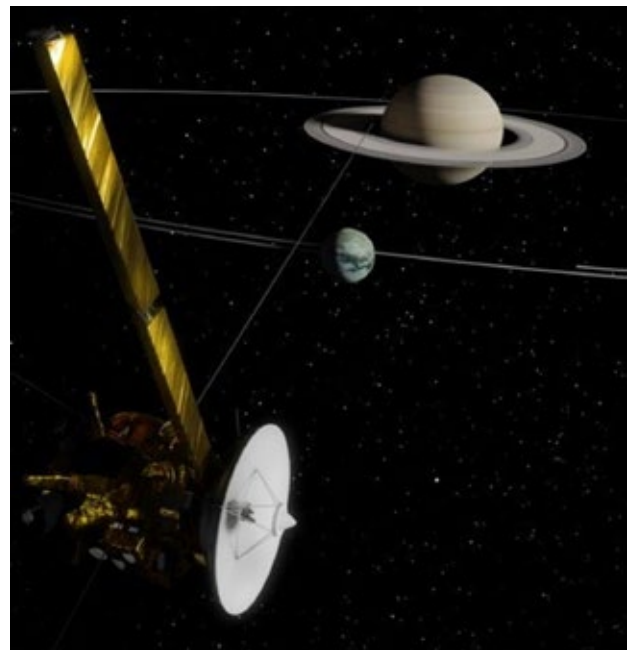


Fig.3. Vue d'artiste de la sonde Cassini en orbite au sein du système de Saturne, tandis que Titan s'éloigne lentement de Saturne sous la rétroaction des marées qu'il lève sur sa planète (crédit : Francesco Fiori, Radio Science and Planetary Exploration Lab).

lors des rencontres proches entre la sonde et le satellite Titan, pour mettre évidence un mécanisme de friction dans Saturne, différent des modélisations traditionnelles. Celui-ci se fonde sur le caractère fluide des intérieurs de planètes gazeuses, et la possibilité de pouvoir dissiper beaucoup d'énergie à des fréquences de marées très spécifiques. En conséquence, les lunes peuvent voir leur orbite évoluer très rapidement, même à de grandes distances comme celle séparant Titan de sa planète.

Les futures missions spatiales

Un avenir radieux se profile désormais à l'horizon pour l'étude des systèmes de planètes géantes. En effet, deux missions d'envergure vont être lancées dans les prochaines années pour étudier le système de Jupiter. La première, nommée Europa Clipper et lancée par la NASA, arrivera normalement en 2029 au sein de ce système pour étudier de près Europe et son océan d'eau liquide. La seconde, lancée par l'ESA en 2022, arrivera à peu près au même moment que son homologue américain pour étudier le système de Jupiter et, quelques années plus tard, se mettre en orbite autour du satellite Ganymède. D'ici là, la mission américaine JUNO, actuellement en orbite autour de Jupiter, devrait profiter d'un éloignement progressif de la sonde pour survoler Io, Europe et Ganymède, préparant ainsi l'arrivée de la prochaine génération de sondes spatiales.

Articles scientifiques de référence (publications dans des revues scientifiques spécialisées) :

- Lainey et al., Nature 2009 ;
- Spencer et al., Science 2007 ;
- Lainey et al., Nature Astronomy 2020 ;
- Thomas et al., Icarus 2016.



Fig.4. Vue d'artiste de la mission Européenne JUICE (ESA) lors de son tour au sein du système jovien. Crédit: Spacecraft: ESA/ATG medialab; Jupiter: NASA/ESA/J. Nichols (University of Leicester); Ganymede: NASA/JPL; Io: NASA/JPL/University of Arizona; Callisto and Europa: NASA/JPL/DLR.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2			■					■			
3							■		■		
4		■									■
5										■	
6						■		■			
7			■	■			■				■
8									■		
9								■			

Verticalement

1. Coefficient maximal de marée.
2. Retire. Comptaient en quipus.
3. Onde pour Newton. 3 ou 51 ou 576.
4. Fusent dans tous les sens. Celle du Clea ne se fera pas en présentiel cette année.
5. Marées montantes. Centra.
6. Pas apprises. Pas off.
7. Cela vaut mieux. On peut l'avoir sur une mer agitée.
8. Elle veut la paix. Fichu.
9. Conjonction. Sorte de manif.
10. Ceux des étoiles viennent de l'arabe, du grec ou du latin. Pote.
11. Travail de recherche en lycée qui pouvait se faire sur les marées. On en a 206. On s'est rué dessus.

Mots croisés : les marées

Horizontalement

1. Pour les marées océaniques, il varie entre 20 et 120.
2. Film de Spielberg. Cubitus. Haut.
3. C'est le premier à avoir expliqué le mécanisme des marées. Pronom.
4. Galaxies déformées par effet de marée.
5. Pour de grands marnages.
6. Prénom. Retenu. Il y en a eu plus d'un sur la Lune.
7. La fin du franc. Le calculateur des marées.
8. Elles subissent aussi des marées mais à grande échelle. Il subit aussi des marées de la part de sa planète.
9. Voyageur. La première sujette aux marées.

Solution p. 48

Un atelier sur les marées

Véronique Hauguel

Un atelier a été présenté à des élèves de 1^{re} dans un lycée près du Havre pour trouver l'heure de marée haute le matin un jour donné avec deux méthodes. L'une utilise l'almanach du facteur de la région donnant les heures des marées au Havre. L'autre méthode, utilisée au XVIII^e siècle, est présentée à partir de volvelles provenant du manuscrit de Denonville (1760).

Quelques définitions

La rose des vents

Sur un disque qu'on divise en 2 puis en 2..., cinq fois, on obtient 32 secteurs et 32 aires de vent ou rumb. Chaque rumb correspond à $11,25^\circ$ ou $3/4$ d'heure sur un disque de deux fois 12 h ($1 \text{ h} = 15^\circ$).

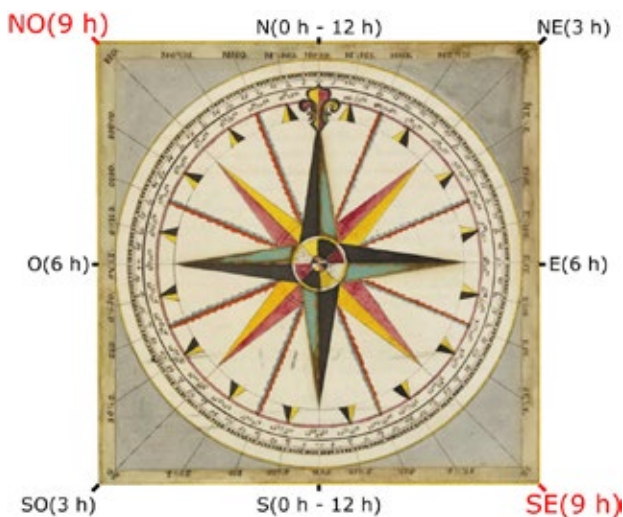


Fig.1. Rose des vents avec les rumb et les heures. Le SE et le NO (traits rouges) correspondent à 9 h, en heure du matin ou de l'après-midi (extrait du manuscrit de Denonville).

On peut considérer que ce schéma représente une boussole dans le plan de l'équateur. Le Soleil (ou son projeté) s'y déplace dans le sens des aiguilles d'une montre en passant au sud à midi et au nord à minuit.

L'âge de la Lune

L'âge de la Lune est le nombre de jours écoulés depuis la dernière nouvelle Lune (quand la Lune est entre le Soleil et la Terre), en estimant la lunaison à 30 jours.

À partir de la nouvelle Lune, la Lune s'écarte du Soleil de 12° ($360^\circ/30$), soit 48 minutes ou $4/5$ d'heure en moyenne par jour ($30 \times 4/5 \text{ h} = 24 \text{ h}$).

L'établissement d'un port

L'établissement d'un port, appelé situation d'un port par Denonville, est l'heure solaire de la marée haute le jour de la nouvelle Lune ou de la pleine Lune.

Le Soleil comme la nouvelle Lune passe au méridien (plein sud) à midi et à l'antiméridien à minuit. À l'opposé, la pleine Lune passe au méridien à minuit et à l'antiméridien à midi. Le jour de la nouvelle Lune ou de la pleine Lune, la marée haute au Havre a lieu à 9 h qui est l'établissement du port. Cela signifie que la marée retarde de 9 h sur le passage de la Lune au méridien. Dans un port donné, la marée haute a toujours le même retard sur le passage de la Lune au méridien. De ce fait, la Lune est toujours dans la même direction à l'heure de la marée haute, à 180° près. Au Havre, à marée haute, la Lune est à $9 \times 15^\circ$, soit 135° du méridien ou de l'antiméridien dans le sens indirect,



Fig.2. Carte des établissements de port dans la Manche. L'onde de marée remonte dans la Manche à partir de Brest. L'établissement du port est de 3 h 46 à Brest et 9 h 09 au Havre (image extraite de l'ouvrage Tout savoir sur les marées d'Odile Guérin, éd. Ouest France, p. 107).

Donc, au Havre, la Lune est, à marée haute, au SE ou au NO sous l'horizon (à 9 heures sur la figure 1).

Sur la rose des vents, le jour de la nouvelle Lune, le Soleil et la Lune sont sur la même aire de vent (même rumb). L'heure de la marée haute est liée à l'orientation du Soleil et de la Lune ce jour (figure 3).

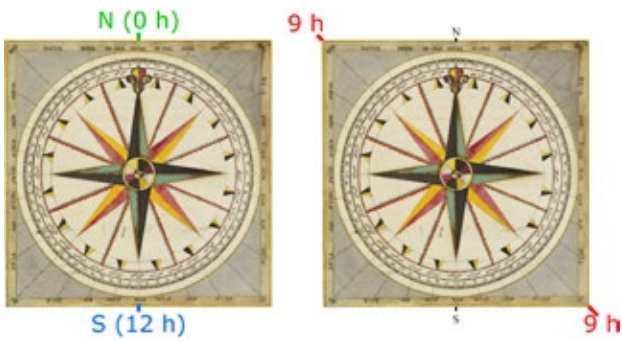


Fig.3. Position du Soleil et de la Lune le jour de la nouvelle Lune au Havre :
 - à gauche, à minuit (en vert) et à midi (en bleu) ;
 - à droite, à l'heure de la marée haute au Havre, donc 9 heures plus tard.

Le lendemain, à marée haute la Lune est à la même place dans le ciel, il est donc 48 minutes plus tard si on estime que l'angle Lune-Soleil est de 12° ou 48 minutes (4/5 h).

Le jour suivant, à marée haute, le Soleil a un écart de 24° ou 96 minutes par rapport à la Lune qui reste à la même place.

Si on considère que la Lune a un mouvement régulier on obtient un tableau de l'heure de la marée en fonction de l'âge de la Lune dont la partie de 0 à 3 jours est :

Âge de la Lune	0	1	2	3
Heure de la marée haute au Havre	9 h	9 h 48	10 h 36	11 h 24
Écart depuis la NL	0	48 min	1 h 36	2 h 24

Cette simple observation de la Lune à marée haute et de l'heure de celle-ci, peut faire l'objet d'un atelier pour des classes d'école primaire.

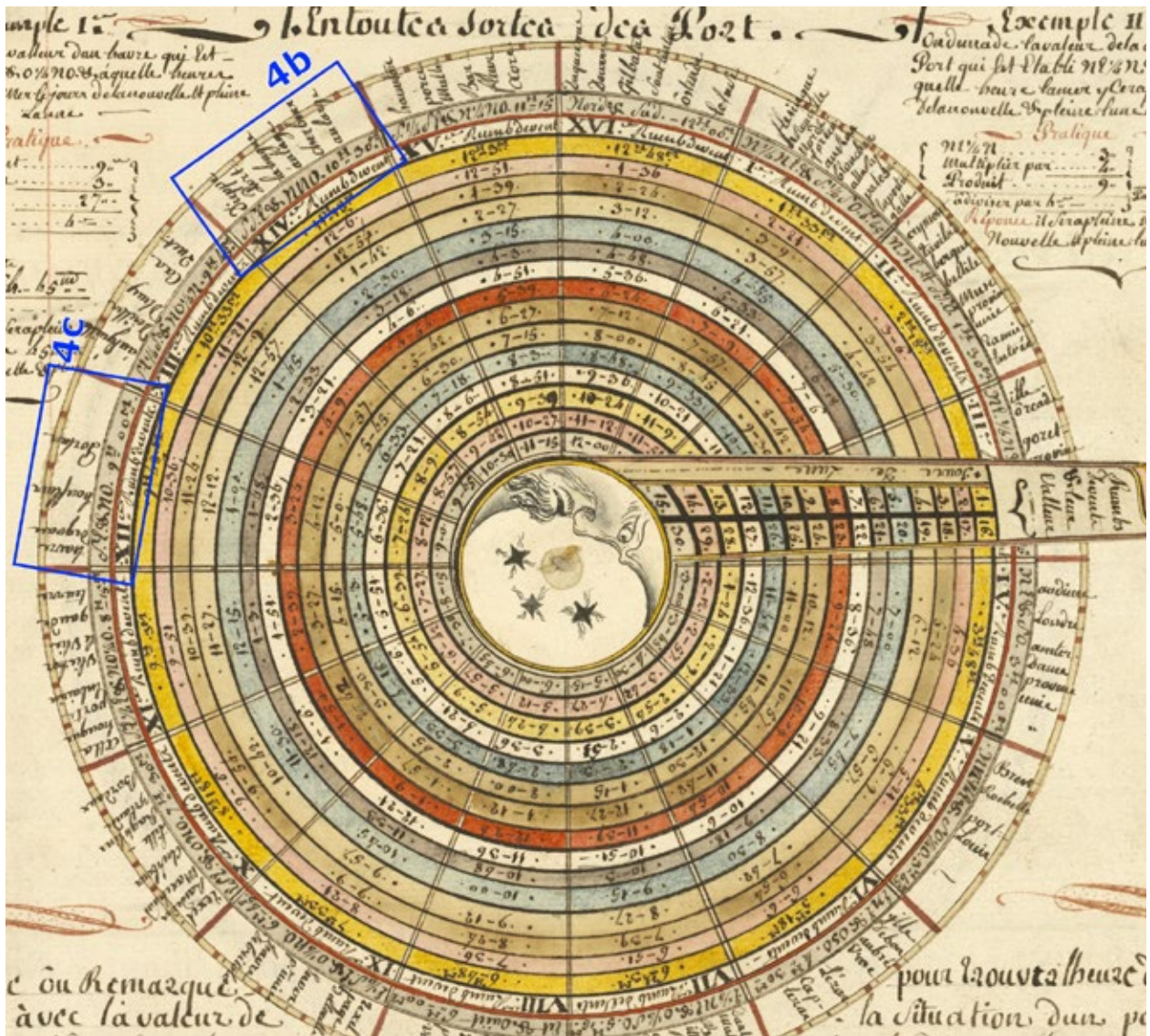


Fig.4a. Volvelle donnant la situation du port de multiples lieux à partir des rumb. Représentation en rond de 16 rumb correspondant à une heure de 0 h à 12 h du matin.

Grâce à l'observation, les marins avaient des tables pour connaître les établissements des ports indispensables pour naviguer quand on s'approchait des côtes. Ces établissements de port étaient donnés pour les heures de marées hautes le matin de 0 h à 12 h. Denoville s'inspire de la rose des vents pour faire une jolie volvelle (figure 4) qui est un disque avec une moitié de rose des vents de 0 h à 12 h comprenant 16 secteurs de 16 rumb de 22,5° ou 45 min (16 × 45 min = 12 h).

Il regroupe ainsi plusieurs dizaines de lieux en fonction de leur établissement de port avec des informations d'heure de pleine mer pour chacun. Chaque secteur correspond à 2 orientations symétriques : par exemple, sur le secteur 4c encadré en bleu (havre de grace), il est noté SE & NO.

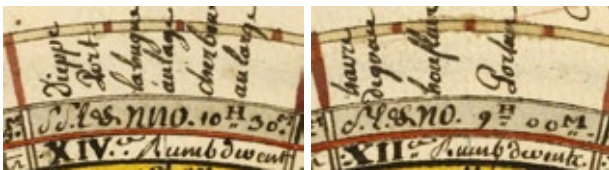


Fig.4. b. Dieppe, SSE & NNO, 10^h30^M, XIV^e rumb de vent.
c. Havre de grace, SE & NO, 9^h00^M, XII^e rumb de vent.
La marée haute à Dieppe est 1 h 30 plus tard qu'au Havre.



Fig.5. Zoom de la volvelle de la figure 4. Une alidade est graduée en jour de Lune de 1 à 15 puis de 16 à 30. Elle permet de donner la lecture directement entre le jour de Lune et l'heure de la marée haute une fois l'alidade placée sur le lieu choisi. Ici par exemple, la règlette est placée pour le Havre et on peut lire 9 h 48 min en face de 1 et 16 pour l'âge de la Lune (ligne jaune).

Application

Après une explication à partir de maquettes et du logiciel *Stellarium* pour expliquer le mouvement de la Lune vu de la Terre et ses phases, on pose le problème suivant.

- Trouver l'heure de la marée haute au Havre, le samedi 22 mai 2021 :
 - a) avec l'almanach du facteur (ou internet) ;
 - b) avec les moyens d'un marin au XVIII^e siècle.
- Comparer a) et b).

L'heure de la marée avec l'almanach du facteur (ou internet)

L'almanach du facteur donne les dates de nouvelle Lune ●, de premier quartier ☾, de pleine Lune ○ et de dernier quartier ☾ (figure 6).

En mai 2021, la nouvelle Lune ● est le 11 mai.

Le 22 mai, la Lune a donc 11 jours.

On peut alors calculer l'heure de la marée haute au Havre en heure solaire ainsi :

$$0 \text{ h (heure du passage de la Lune au méridien à la NL)} \\ + 11 \times 48 \text{ min (retard de 48 min par jour)} \\ + 9 \text{ h 09 (établissement du port, voir figure 2)} \\ = 17 \text{ h 57 min ou } 5 \text{ h 57 min}$$

À l'intérieur de l'almanach 2021 du département 76, page 8, se trouve également un tableau avec les heures légales des marées au Havre, calculées par le SHOM, pour chaque mois de l'année (figure 7). Sur ce tableau, on lit que l'heure de la marée haute est à 7 h 47 du matin (heure légale) le 22 mai 2021 au Havre. Pour comparer avec le résultat précédent, on peut donner cette heure légale H_L en heure solaire H_S par la formule :

$$H_L = H_S + E + L + (1 \text{ h ou } 2 \text{ h})$$

H_S : heure solaire

E : équation du temps

L : longitude du lieu (en heures, minutes, secondes)

MAI	
Les jours augmentent de 1 h 16	
1 S	FÊTE DU TRAVAIL
2 D	BORIS
3 L	PHILIPPE, JACQUES ☾ 18
4 M	SYLVAIN
5 M	JUDITH
6 J	PRUDENCE
7 V	GISÈLE
8 S	VICTOIRE 1945
9 D	F. J. D'ARC - J. EUR. ● 19
10 L	SOLANGE
11 M	ESTELLE, S.G. ○
12 M	ACHILLE, S.G.
13 J	ASCENSION, S.G.
14 V	MATTHIAS
15 S	DENISE
16 D	HONORÉ
17 L	PASCAL
18 M	ÉRIC
19 M	YVES ☾
20 J	BERNARDIN
21 V	CONSTANTIN ☾
22 S	ÉMILE
23 D	PENTECÔTE
24 L	DONATIEN
25 M	SOPHIE
26 M	BÉRENGER q.t. ○
27 J	AUGUSTIN DE C.
28 V	GERMAIN
29 S	AYMAR
30 D	F. DES MÈRES - TRINITÉ
31 L	VISITATION

Mai					
Date	Pleines mers		Basses mers		
	Matin h mn	Coef	Soir h mn	Coef	
01 S	02 22	93	14 48	85	
02 D	03 06	77	15 39	68	
03 L	03 57	60	16 43	53	
04 M	05 07	47	18 10	43	
05 M	06 35	42	19 30	44	
06 J	07 54	46	20 41	51	
07 V	08 58	55	21 33	60	
08 S	09 47	64	22 13	68	
09 D	10 26	71	22 48	74	
10 L	11 02	76	23 19	78	
11 M	11 34	79	23 48	80	
12 M	---	---	24 06	80	
13 J	00 18	80	24 38	79	
14 V	00 48	78	25 10	76	
15 S	01 18	74	25 42	71	
16 D	01 49	67	26 18	64	
17 L	02 25	60	26 59	56	
18 M	03 08	51	27 47	47	
19 M	04 01	44	28 41	41	
20 J	05 09	40	29 40	---	
21 V	06 30	43	30 46	47	
22 S	07 47	53	31 59	59	
23 D	08 51	66	02 27	73	
24 L	09 46	81	03 16	87	
25 M	10 36	92	04 03	97	
26 M	11 25	100	04 49	103	
27 J	---	---	05 34	103	
28 V	00 35	103	06 18	101	
29 S	01 20	98	07 00	94	
30 D	02 06	89	07 49	83	
31 L	02 53	77	08 45	70	

Fig.6. Le mois de mai de l'almanach 2021.

Fig.7. Les horaires de marées au Havre en mai 2021.

Sachant que :

- la longitude du Havre est 6° E soit - 24 s (on a 15° pour 1 h) ;
- l'équation du temps le 22 mai : - 3 min 18 s ;
- l'heure d'été : 2 heures ;
- $H_L = 7 \text{ h } 47 \text{ min}$,

on trouve $H_s = 5 \text{ h } 51$. L'heure solaire de la marée haute au Havre le 22 mai 2020 est 5 h 50 min. Le calcul précédent donnait un résultat correct à 6 minutes près.

Autre activité possible : on peut chercher les heures des marées de pleine mer pour chaque pleine Lune au Havre en 2021 et comparer ces heures. Obtient-on l'établissement du port du Havre ?

Réponse : on obtient entre 9 h 19 et 10 h 03 (tableau ci-dessous). La méthode utilisée précédemment est donc très approximative, mais elle permet d'avoir l'heure de la marée haute à 1 h près.

Date de NL	$H_{\text{Légale}}$	Équation du temps	H_{Solaire}
13 jan	10 h 43	+ 9 min	9 h 34
11 fév	10 h 34	+ 14 min	9 h 20
13 mars	10 h 56	+ 9 min	9 h 47
12 avr	12 h 02	+ 1 min	10 h 01
11 mai	11 h 34	- 4 min	9 h 38
10 juin	11 h 44	0	9 h 44
10 juil	12 h 04	+ 5 min	9 h 59
8 août	11 h 47	+ 6 min	9 h 41
7 sept	12 h 01	- 2 min	10 h 03
6 oct	11 h 33	- 12 min	9 h 45
4 nov	10 h 03	- 16 min	9 h 19
4 déc	10 h 22	- 10 min	9 h 32

Heures de la marée haute à la nouvelle Lune au Havre en 2021, en heure légale, puis en heure solaire.

L'heure de la marée avec les moyens d'un marin au XVIII^e siècle

Il faut dans un premier temps connaître la situation du port¹ puis chercher l'âge de la Lune et enfin en déduire l'heure solaire de la marée haute.

La situation du port

Sur la volvelle (figures 4a et 4c), on cherche la ville *havre de grace*. La situation du port au Havre est SE & NO correspondant à 9 h.

L'âge de la Lune

Au XVIII^e siècle, dans leur formation, les pilotes apprenaient à retrouver les dates des nouvelles lunes par le comput ecclésiastique. Il fallait alors

¹ Denoville utilise l'expression « situation d'un port » pour l'établissement du port.

connaître l'année pour calculer l'épacte (l'âge de la Lune au 31 décembre de l'année précédente)² puis on en déduisait les dates des nouvelles lunes et donc l'âge de la Lune un jour donné. Des moyens mnémotechniques ou avec les doigts, des tables ou des volvelles leur faisaient éviter les calculs.

Actuellement, l'épacte de l'année se lit sur l'almanach du facteur sous le mois de février avec d'autres données comme le nombre d'or. L'épacte de 2021 est 16.

Épacte 16 - Lettre dominicale C Cycle solaire 14 - Nombre d'or 8 Indiction romaine 14

Fig.8. Épacte, nombre d'or,... sur l'almanach du facteur 2021.

À l'aide de la volvelle des nouvelles lunes (figure 9), on lit que la nouvelle Lune en mai, pour une épacte de 15, est le 12 mai. Donc pour une épacte³ de 16, c'est le 11 mai. L'âge de la Lune le 22 mai est donc de 11 jours.



Fig.9. Volvelle donnant les dates des nouvelles lunes quand on connaît l'épacte. À l'épacte 15, le jour de la nouvelle lune en mai est le 12.

L'heure de la marée haute le 22 mai 2021

Pour trouver l'heure de la marée haute cherchée :

- on peut lire le résultat sur la figure 5. L'alidade, graduée en jours de Lune, est positionnée sur le port du Havre. En face de 11 jours (l'âge de la Lune), on lit 5 h 48 min.

- on peut faire le calcul comme précédemment :

$$11 \times 48 \text{ min} = 11 \times 4/5 \text{ h} = 8 \text{ h } 48 \text{ min}$$

Cet écart est à ajouter à la situation du port. L'heure de la marée haute le matin est :

$$9 \text{ h} + 8 \text{ h } 48 - 12 \text{ h} = 5 \text{ h } 48 \text{ min}$$

Avec ces 2 moyens, pour une Lune de 11 jours, l'heure de la marée haute au Havre en heure solaire est 5 h 48 min.

Denoville propose une autre volvelle remarquable. Comme l'heure de marée haute est liée à la situation

² Voir CC n° 136, 2011.

³ Il n'y a pas d'épacte de 16 au XVIII^e siècle. La formule change à certaine année séculaire, elle a changé en 1900.

<http://assprouen.free.fr/denoville/dossierPDF/0403.pdf>

du port et à l'âge de la Lune (ou son orientation), la volvelle « à trois variables » de la figure 10 permet de trouver une variable si on connaît les deux autres.

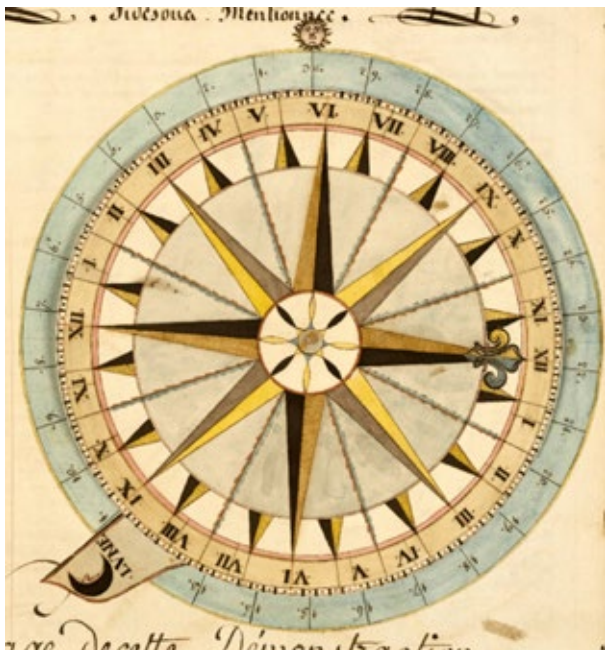


Fig.10. Volvelle « à trois variables ».

Pour l'exercice proposé, l'index lunaire est réglé sur la situation NE ou SE ou 9 h (IX) de la rose des vents centrale. Puis on tourne l'ensemble index et rose des vents pour amener l'index sur 11 jours. On lit l'heure sur le diamètre vertical en haut sous le Soleil.

Pour une Lune de 11 jours, l'heure de la marée haute au Havre en heure solaire est 5 h 48 min (chaque heure est partagée en 5 parties de 12 min donc 5 h + 4 parties de 12 min = 5 h 48 min).

Le fonctionnement de la volvelle est expliqué sur la figure 11.

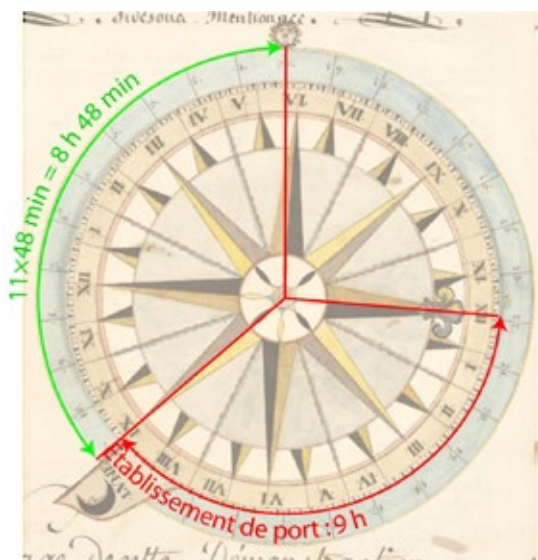


Fig.11. Fonctionnement de la volvelle des marées. L'heure de la marée s'obtient en effectuant graphiquement l'addition 9 h + 11 x 48 min = 17 h 48 ou 5 h 48.

Conclusion

Avec le SHOM, l'heure de la marée haute le 22 mai 2021 est 5 h 44 min et avec les moyens de Denoville en 1760, l'heure solaire est 5 h 48 min ! La date a été choisie par hasard (vous n'êtes pas obligés de me croire...) mais le résultat est trop beau pour être vrai ! J'ai donc recommencé avec quelques autres dates en 2021 au Havre :

- Calcul de l'âge de la Lune :

date	NL*		Âge de la Lune
	Almanach	Volvelle	
26 mars	13 mars	13 mars	13
8 juin	10 juin	10 juin	28
12 déc	4 déc.	4 déc.	8

*En juillet et novembre, il y a un décalage de 1 jour dans les dates de NL.

- Calcul des heures de marée pour ces 3 dates⁴ avec chacune des méthodes :

date	Avec le SHOM			Avec la volvelle à 3 variables
	H _L	Éq du t.	H _S	
26 mars	9 h 07	+ 6 min	8 h 07	7 h 24
8 juin	10 h 32	- 1 min	8 h 33	7 h 22
12 déc.	5 h 12	- 6 min	4 h 18	3 h 24

Effectivement, j'ai eu la main heureuse ! L'erreur peut dépasser une heure. Cependant ces moyens rendaient de fiers services aux navigateurs qui connaissaient par expérience la précision de leur calcul mais aussi les risques qu'ils encouraient sans ces calculs.

Quelques liens

Le site de l'ASSP de Rouen propose de nombreux documents sur Denoville.

Vous trouverez en particulier les volvelles décrites ici sous forme animée (on peut les manipuler) :

- pour trouver le jour de la nouvelle Lune (figure 9) <http://assprouen.free.fr/denoville/animations/deno-08/deno-08.html> ;
- la volvelle des situations du port (figure 4) <http://assprouen.free.fr/denoville/animations/deno-13/deno-13.html> ;
- la volvelle à 3 variables (figure 10) <http://assprouen.free.fr/denoville/animations/deno-15/deno-15.html>.

Sur l'épacte et le nombre d'or : <http://assprouen.free.fr/denoville/dossierPDF/0403.pdf>

⁴ L'épacte d'une année fonctionne de mars de l'année à fin février de l'année suivante. C'est pourquoi, je ne choisis pas de date en janvier et février.

Les marées galactiques

Pierre-Alain Duc, astrophysicien à l'Observatoire astronomique de Strasbourg

Les marées galactiques sont au cœur de la vie tourmentée des galaxies. Ces galaxies vivent au gré des marées, celles-ci engendrent des tsunamis gigantesques, des fusions monstrueuses qui peuvent engendrer des bébés galaxies gardant pour un temps des cordons ombilicaux avec leurs progéniteurs avant de s'émanciper progressivement. La vie des galaxies, une aventure qui n'a pas fini de vous étonner.

Sur le littoral marin, les marées rythment la vie des hommes. À l'échelle de notre planète, l'influence gravitationnelle récurrente de la Lune et du Soleil sur les surfaces océaniques mais aussi continentales joue un rôle essentiel sur la dynamique et la stabilité du système Terre. Pour d'autres planètes et satellites de notre Système solaire, à l'instar du couple Io - Jupiter, les forces gravitationnelles différentielles induites exacerbent l'activité volcanique. Aux échelles stellaires, les marées déchirent les couples d'étoiles jusqu'à leur explosion. Aux plus grandes échelles, les forces dites de marée jouent un rôle essentiel dans notre compréhension de l'Univers. Ainsi les galaxies vivent aussi au gré des marées ou plutôt des collisions qui les génèrent. Elles façonnent d'ailleurs encore plus les paysages galactiques que planétaires.

Pour introduire ces phénomènes longtemps ignorés, partons d'images de galaxies, pas celles traditionnelles

de belles spirales ou elliptiques régulières, présentes sur le célèbre diagramme de Hubble. Attachons-nous plutôt à des objets galactiques aux formes chaotiques difficilement classifiables, tels ceux illustrés sur la figure 1. Ils présentent des protubérances parfois larges et épaisses qualifiées de plumes. Parfois se déploient de longues et étroites structures filamentaires assimilées à des queues, antennes ou courants. Quelquefois des coquilles ou anneaux encerclent un corps principal lui plus régulier.

Longtemps ces extensions ont intrigué. Elles étaient visibles dès les années 1950 sur les plaques photographiques de relevés systématiques du ciel comme ceux effectués au Mont Palomar. Dans les catalogues et atlas, elles valurent à leurs hôtes galactiques d'être regroupés dans la catégorie des galaxies dites particulières, car ni spirales, ni elliptiques, une classe d'objets peu fournie à l'époque : moins de 10 % d'entre elles étaient bannies dans cette sous-classe.

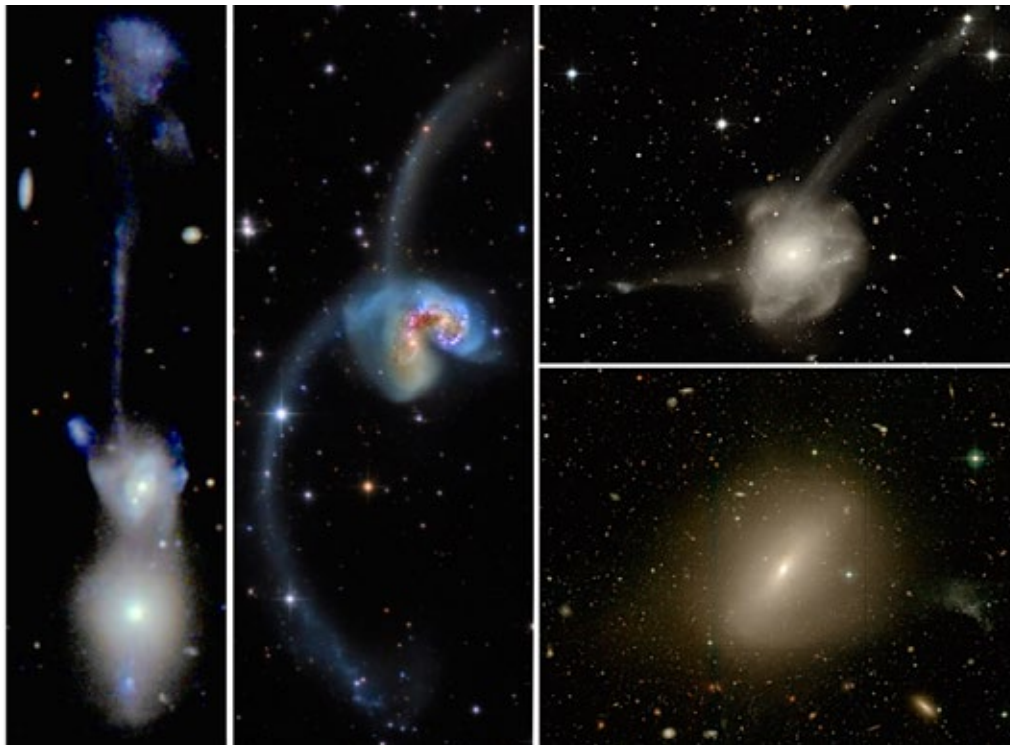


Fig.1. Séquence observationnelle de collisions galactiques, de la rencontre initiale à la fusion finale, 4 galaxies en interaction. Crédit : Duc/Eder Ivan/CFHT/ESO.

Naturellement les astronomes se sont alors interrogés sur les processus physiques produisant de telles excroissances. S'agissait-il du même phénomène que celui à l'origine des jets phénoménaux qui émanent du cœur des galaxies, là où se tapirait ce « monstre » galactique, bientôt connu sous le nom de noyau actif ou quasar ? Autrement dit, un phénomène associé au trou noir ultra massif qui, on le sait aujourd'hui, est présent au centre de chaque galaxie ? Alimenté par l'afflux de gaz, l'objet compact central se réveille ; tout en l'ingérant, il éructe de la matière et surtout du rayonnement le long de jets gigantesques qui parviennent à s'échapper de la galaxie. Sa manière à lui de respecter les lois de la physique, en particulier la conservation du moment angulaire. De fait on connaît dans certains amas de galaxies des jets visibles en particulier dans le domaine radio qui s'étendent sur des centaines de kiloparsecs voire atteignent l'échelle du mégaparsec. Par ailleurs certaines théories rendent de tels jets responsables de la « mort » des galaxies, c'est-à-dire dans le jargon des astronomes de leur incapacité à former de nouvelles générations d'étoiles. En effet, ceux-ci balayeraient les réserves de gaz galactiques. Plus de fuel, plus d'étoiles.

Pourtant, ces jets ne peuvent être invoqués pour les galaxies qui nous intéressent. Comment tout d'abord expliquer les formes parfois évasées des protubérances galactiques ? En effet, s'il s'agissait de jets nucléaires, collimatés, elles devraient être toujours étroites et par ailleurs le plus souvent rectilignes. Or des courbures, voire des enroulements caractérisent nombre de ces structures. Leurs couleurs ne sont pas non plus celles attendues pour l'émission synchrotron, caractéristique des jets ; elles sont plus proches de celles des étoiles. Ainsi leurs teintes présentent des nuances de bleu ou rouge, tout comme les populations stellaires selon qu'elles sont plutôt jeunes ou vieilles. Les spectrographes d'aujourd'hui à la sensibilité décuplée, en particulier ceux dit à intégrale de champ comme l'instrument MUSE installé sur le Very Large Telescope au Chili, permettent de mesurer le spectre des antennes ou coquilles galactiques, un challenge vu leur faible luminosité. Ils révèlent des raies d'absorption typiques des étoiles vieilles et parfois des régions d'émission semblables à celles présentes dans les régions de formation d'étoiles.

Les excroissances de nos galaxies sont donc bel et bien des structures stellaires constituées pour l'essentiel d'étoiles qui ont dû être expulsées de galaxies parents, même si certaines de leurs étoiles ont pu se former in situ. Par quel mécanisme ?

Une activité nucléaire ne peut être invoquée, nous l'avons compris : malgré sa forte énergie, elle serait d'ailleurs incapable de chasser directement des étoiles. Des interactions entre étoiles, étoiles et trous noirs, peuvent éventuellement aboutir à l'expulsion d'astres, mais pas de manière à produire de longues queues.

Le lecteur de ce numéro des Cahiers Clairaut ne sera pas surpris si nous attribuons aux forces dites de marées le rôle principal. Mais il a fallu attendre les années 1970 pour que cela devienne une évidence, car l'intuition n'était guère éclairante. En effet quelle ressemblance entre le soulèvement intermittent et limité des océans – au plus quelques mètres à comparer avec des profondeurs océaniques atteignant plusieurs kilomètres – et des antennes galactiques pouvant dépasser des tailles de 100 kpc, soit 10 fois le rayon de leur hôte ? De tels « raz de marée » ne sont heureusement pas observés sur Terre. Il a fallu attendre le développement de modèles sur ordinateur pour constater que des tsunamis gigantesques se produisent bien aux échelles galactiques. Ces premières simulations étaient sommaires et se restreignaient à la modélisation de leurs seules étoiles alors que les galaxies possèdent du gaz et (beaucoup) de matière noire, avec un nombre très restreint de particules, quelques dizaines, réagissant à une seule loi de la physique, celle de la gravité $G m/r^2$. Pourtant ces implantations basiques sur des calculateurs bien moins puissants que les smartphones d'aujourd'hui ont suffi pour reproduire les formes de quelques galaxies de référence, comme celle bien connue dite des Antennes (NGC 4038/39) avec ses appendices éponymes. Il ne restait donc guère de doutes pour les astronomes : la gravité, ou plus exactement la gravité différentielle responsable des marées, peut seule rendre compte de la forme de ces structures. Les simulations suivantes, disposant de beaucoup plus de particules, et aptes à modéliser le comportement des étoiles, du gaz mais aussi de la matière noire, ne feront que confirmer cette hypothèse. Elles furent capables de reproduire non seulement la forme mais aussi le champ de vitesse et les couleurs des queues qui désormais s'appelleront « de marée ».

Bien entendu, les marées s'exercent à condition qu'il y ait plusieurs protagonistes. Pour celles qui soulèvent les océans, on invoque l'interaction entre la Terre, la Lune et dans une moindre mesure le Soleil. Dans le cas qui nous intéresse, les marées résultent de l'interaction gravitationnelle entre deux galaxies qui se rapprochent mutuellement, entrent en collision et éventuellement fusionnent. À vrai dire, on aurait pu songer bien avant au rôle des collisions dans

la formation des queues galactiques. En effet, sur nombre d'images de ces galaxies dites particulières, on distingue non pas une galaxie, mais deux, voire plus. Parfois bien séparés, les disques galactiques souvent se chevauchent ou se superposent, leurs noyaux respectifs restant bien distincts. Le processus de collision aboutit dans la plupart des cas à une fusion complète des galaxies parents qui perdent leur identité propre. Restent alors dans l'environnement du couple désormais amalgamé ces débris stellaires, façonnées par les forces de marée et qui témoignent ainsi de la collision passée. Peu à peu – en quelques milliards d'années – leur émission lumineuse va s'estomper et disparaître des images des télescopes, comme l'illustre la figure 1.

Nous comprenons désormais l'origine physique des structures de marée, et les simulons sur ordinateur. Peut-on aller plus loin et avoir une approche plus mathématique du phénomène, au delà de la simple constatation que la gravité agit en $1/r^2$ et les forces de marée en $1/r^3$? Une mise en équation des marées océaniques a été depuis longtemps réalisée en particulier pour prévoir précisément leur heure et amplitude dans un lieu donné. Le calendrier des marées galactiques lui n'existe pas : elles sont en effet d'une nature différente, impulsive plutôt que récurrente et du coup difficilement mises en formules mathématiques.

Seules les simulations sur ordinateur, telles celle présentée sur la figure 2, rendent précisément compte des phénomènes en jeu. Commence une phase initialement calme lors de l'approche initiale durant lesquelles les deux galaxies sont peu ou prou perturbées. Suit une réponse impulsionnelle forte juste après le « premier passage » au « périapse », moment où les orbites des protagonistes se croisent au plus près. Le mouvement de leurs étoiles est alors fortement perturbé. Interviennent des phénomènes de résonance qui contribueront à expulser hors des disques galactiques une fraction des étoiles – celles qui formeront ces coquilles ou queues de marée – et à en faire migrer dans les régions internes une autre partie. La rotation initiale autour du centre galactique est ralentie ; les mouvements sont de plus en plus aléatoires ; le disque galactique s'épaissit : il « chauffe » selon le terme consacré. S'initie une transformation morphologique, possiblement exacerbée par des instabilités généralisées, et qui aboutit à une mutation des spirales en elliptiques. De type tardif, la morphologie des galaxies devient précoce, avec la terminologie en vogue depuis la classification quelque peu ambiguë effectuée par le célèbre astronome Edwin Hubble. Curieux renversement de l'ordre des choses, qui semble suggérer un rajeunissement des galaxies alors qu'elles sont sur le point de mourir !

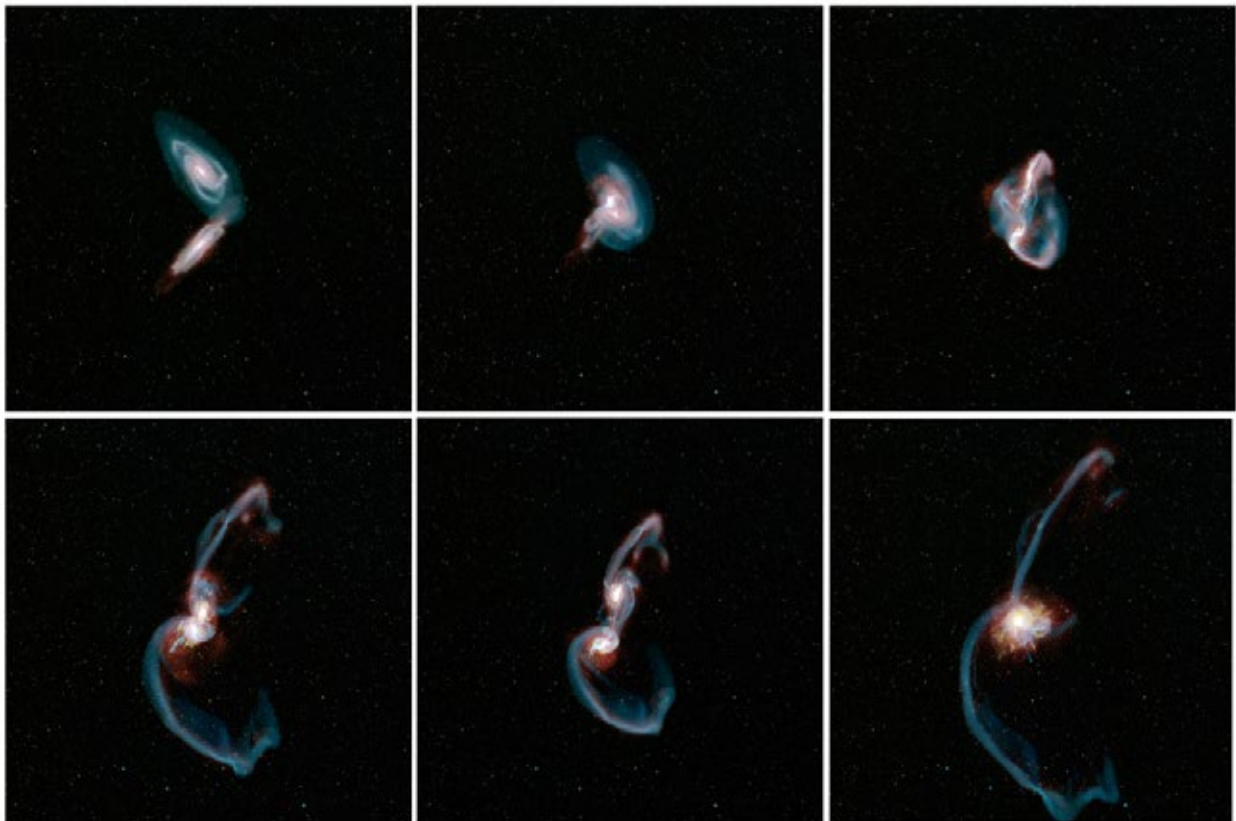


Fig.2. Séquence simulée d'une collision galactique : de la rencontre initiale à la fusion finale, 6 moments de l'interaction de marée. Crédit : Renaud/Bournaud/Duc.

Démarré alors une valse cosmique : les deux galaxies moribondes déjà en partie déchirées tournent l'une autour de l'autre tout en se rapprochant inexorablement, sous l'effet de la friction dynamique exercée par la matière noire. À ce stade, si leurs disques respectifs ne s'interpénètrent pas encore, leurs halos de matière noire, bien plus étendus, ont en effet déjà fusionné. Les queues de marée formées lors de l'épisode précédent peuvent alors s'entrelacer ou se joindre pour constituer des ponts de matière.

Enfin le bouquet final : la fusion proprement dite illuminée par un sursaut de formation stellaire induite par l'afflux au cœur des galaxies de nuages de gaz canalisés le long de barres stellaires. En effet, toute la matière subit les forces de marée, et pas seulement les étoiles. Aussi trouve-t-on aussi en quantité des réserves de gaz dans les queues de marée stellaires dont elles épousent la forme. Une fraction des nuages peut s'y effondrer et former, hors des disques galactiques fusionnés, de nouveaux objets, des galaxies naines dites « de marée », bébés galaxies nées de l'accouplement de leurs parents. Lorsque ces cordons ombilicaux qui les lient à leurs progéniteurs – les queues de marée – s'estomperont, les naines de marée prendront leur indépendance, mais resteront longtemps des satellites de leurs parents. Encore riches en gaz, seules ces structures auront d'ailleurs la capacité à continuer à former des étoiles. En effet, la flambée stellaire initiale de leurs défunts ancêtres s'épuise rapidement faute de carburant.

S'ajoute un autre phénomène évoqué plus tôt : une partie du gaz aiguillé au cœur des galaxies alimente le trou noir central ultra massif qui sort de son hibernation, un réveil qui, comme on l'a déjà évoqué, s'accompagne de la génération de jets puissants qui balayent le gaz restant, éteignant les derniers soubresauts de formation stellaire. L'histoire se complique donc : jets et queues de marée peuvent cohabiter, mais ces deux structures restent de nature et d'origine fondamentalement différentes, même si le déclencheur est le même : une collision.

Comprendre comment les galaxies s'étouffent (sont « quenchées » en mauvais jargon) et le rôle des collisions dans ce processus est un sujet qui occupe les astronomes depuis des années. Nous avons mentionné ci-dessus plusieurs explications. S'en ajoute une, les super-vents produits lors de l'intensification momentanée de la formation stellaire lors de la fusion. Les étoiles massives peuvent alors perdre leurs enveloppes de gaz à des vitesses dépassant les centaines voire le millier de kilomètres par seconde. Ces vents se cumulent et

acquièrent une force d'entraînement importante pouvant expulser une grosse partie du gaz, comme peuvent aussi le faire les jets nucléaires. Mais un résultat encore frais, publié en janvier 2021 dans le journal *Nature astronomy*, jette un trouble : une étude d'une galaxie lointaine avec l'interféromètre ALMA suggérerait que les galaxies seraient dépouillées de l'essentiel de leur gaz, non via les super-vents ou les super-jets, mais le long des queues de marée... Les marées pourraient non seulement refaçonner les galaxies, en métamorphosant leur morphologie, mais aussi les tuer en les privant de carburant.

L'histoire que nous venons de décrire, qui dure environ 500 millions d'années, et est ponctuée d'une approche et d'un flirt gentils, d'une valse à plusieurs temps avant une étreinte fatale, n'est toutefois pas celle de toutes les collisions galactiques. Elle doit être adaptée à chaque type de galaxies voire à chaque galaxie selon leurs propriétés et environnement particuliers. Ainsi une simulation numérique de collision, même idéalisée (c.-à-d. comportant juste deux galaxies isolées), comporte des dizaines de paramètres initiaux à ajuster : vitesse relative des protagonistes, géométrie de leurs orbites, taille et masse respectives de leurs disques de gaz et d'étoiles, extension de leur halo de matière noire, rapport de masse entre chaque galaxie, morphologie d'origine, etc. Un changement de chacun de ces paramètres, et les forces de marée résultantes sont amplifiées ou modérées. D'où cette impossibilité de rendre compte de toute cette variété à l'aide d'équations ; même pour réaliser des simulations sur ordinateur, il convient d'effectuer des hypothèses et restreindre le nombre de paramètres à varier. L'exploration systématique de toutes les conditions initiales reste irréaliste y compris avec les plus grands calculateurs.

Les images des galaxies particulières illustrent d'ailleurs la variété des possibilités. Les débris de collision ne se présentent pas tous comme d'élégantes antennes élancées, celles modélisées par les premières simulations des années 1970. Ils sont souvent informes, grossiers ou épais. Pour produire de belles et longues queues de marée, il faut disposer de deux galaxies au disque fin, « froid », en rotation, se heurtant tranquillement – à quelques centaines de kilomètres par seconde tout de même – avec un paramètre d'impact, la distance au périapse, assez élevé. Un concours de circonstances somme toute assez rare ! Une collision avec des galaxies de type plus précoce, au disque chaud, générera des débris bien moins spectaculaires, au mieux des plumes, sortes de renflements larges mais peu étendus. Dans le cas d'une collision dite mineure, faisant intervenir

des galaxies de masse disparates, seule la moins massive, le « satellite », sera significativement affectée. L'influence gravitationnelle de la galaxie hôte et des forces de marée induites entraînent l'épluchage de la quasi totalité de ses étoiles le long de longs filaments stellaires. Avec le temps, ces derniers s'enroulent autour de la galaxie primaire. Leurs traces dessinent ainsi l'orbite du satellite, une propriété que nous serons amenés à exploiter un peu plus loin.

Revenons aux collisions majeures, entre galaxies de masse semblables. La manière dont elles se rencontrent influent sur l'apparence des reliquats. Ainsi une collision de plein fouet génère des séries de coquilles concentriques facilement reconnaissables ; elles résultent de l'oscillation des étoiles et leurs accumulations ponctuelles telles les ondes produites lorsqu'une pierre percute une surface liquide. Autre complication, une forme ne peut être qu'apparente à cause des effets de projection : le télescope ne donne qu'une vue 2D des astres car leur lumière est projetée sur le plan du ciel. Ainsi, selon l'orientation de la ligne de vue, des coquilles ne se présenteront plus comme des cercles concentriques, tandis que des queues de marée en réalité incurvées apparaîtront comme des filaments rectilignes ressemblant à des jets. Heureusement, nous disposons de simulations sur ordinateur qui peuvent, sous certaines hypothèses, rétablir notre vision en 3D.

Dans notre inventaire des appendices de marée et de leur histoire, nous avons jusqu'à présent omis un facteur pourtant essentiel, le temps : avec les centaines de millions d'années, ces structures stellaires s'estompent et s'évaporent. Par ailleurs, suite à de nouvelles collisions, les débris peuvent se mélanger, formant un amalgame pouvant in fine se présenter comme un halo diffus et étendu entourant les galaxies. Or le rythme avec lequel la visibilité des structures individuelles s'affaiblit dépend de leur type : les coquilles aux contours marqués resteront perceptibles plus longtemps (jusqu'à 5 milliards d'années) que les évanescentes queues de marée aux faibles brillances de surface qui s'étendent, et voient leur lumière devenir si diffuse qu'elle se confond rapidement avec le fond du ciel.

Du coup, on peut exploiter cette propriété et ce temps de survie limité pour dater les derniers épisodes de collisions galactiques, et ainsi reconstruire l'histoire passée des galaxies. C'est là l'objet de travaux effectués en particulier à l'Observatoire astronomique de Strasbourg. En exploitant des données d'observatoires spatiaux tels Gaia pour notre Voie

lactée, ou de relevés profonds d'environnements plus éloignés, réalisés entre autres avec le télescope Canada-France-Hawaii, les astronomes recherchent autour des galaxies d'aujourd'hui les restes de ces collisions passées qui les ont façonnées (voir la figure 3). En effet, selon le modèle standard, dit hiérarchique, qui postule l'existence d'une matière noire dite froide que l'on recherche encore activement, les galaxies ne naissent pas comme de massives elliptiques ou spirales : elles le deviennent graduellement par fusions successives de galaxies de plus petites masses. Chaque collision engendre donc des débris suite aux forces de marée qui s'y sont exercées. Leur sondage systématique autour des galaxies issues de cet assemblage cosmique est la technique employée par les astronomes pratiquant l'archéologie galactique. Elle est complémentaire à celle utilisée par d'autres chercheurs qui, à l'aide de ces machines à remonter le temps que sont les gros télescopes, pointent les objets les plus lointains et donc les plus jeunes. Les uns essaient de prévoir le devenir des galaxies à partir de leurs photos de naissance ; les autres imaginent la jeunesse des vieilles galaxies d'aujourd'hui en essayant de caractériser et dater leurs rides.

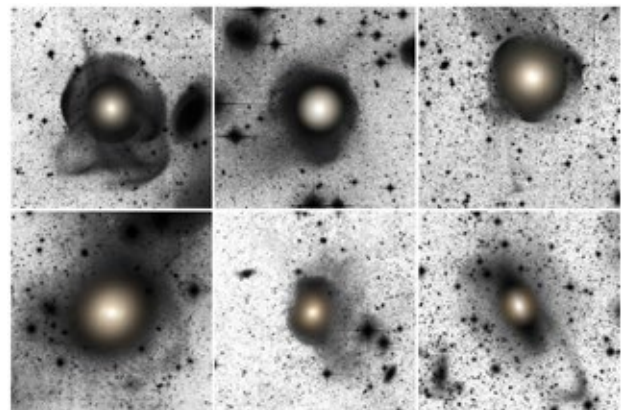


Fig.3. Vieux débris de marée autour de galaxies elliptiques : coquilles, queues et filaments témoignent de collisions passées. Crédit : Duc/MATLAS/CFHT

Les opérations de fouille et d'inventaire des débris de marée sont délicates. Le plus souvent nous ne disposons sur elles comme seuls éléments d'information des images un peu floues, et plus ou moins colorées. Les détecter demeure un challenge, surtout lorsqu'elles sont vieilles : leur brillance est alors bien plus faible que celle du fond du ciel, qu'il faut alors soustraire d'une manière ou d'une autre. Il convient ainsi d'adopter des stratégies d'observation et de traitement de données ad hoc, aptes à révéler des structures parfois étendues mais très diffuses qui, bien que proches, ont échappé à la sagacité des observateurs du ciel. L'exploration de cet univers

à faible brillance de surface, encore mal connu, a récemment suscité de nombreux développements instrumentaux, certains très innovants.

Pour les structures de marée les plus proches, telles celles présentes à profusion autour de notre Galaxie, il faut faire appel à une autre technique : on ne recherche plus une lumière diffuse issue d'une myriade d'étoiles qui se confondent, mais des étoiles individuelles. L'avantage est considérable : en utilisant un instrument tel Gaia, qui est en train de faire un relevé de la position mais aussi du mouvement propre de près de deux milliards d'étoiles (ainsi que de leur vitesse pour une fraction d'entre elles), les astronomes peuvent non seulement déterminer la forme et l'extension exactes des débris, avec une sensibilité et une précision bien plus grande que lorsque la lumière diffuse est exploitée, mais aussi connaître leur cinématique. Ce passage d'une vision statique à une appréhension dynamique des structures de marée autorise leur exploitation pour un autre champ de recherche, tout aussi important que la reconstruction de l'histoire collisionnelle des galaxies : la détermination de la forme des halos de matière noire, la composante censée être la plus massive des galaxies selon les modèles cosmologiques standards. En effet, les queues de marée, en particulier celles issues de petites galaxies satellites de la Voie lactée, voire d'amas globulaires – Gaia en a recensé de nombreuses –, servent de

sondes du halo noir, que sentent les étoiles puisque leurs trajectoires sont perturbées par sa présence, mais qui jusqu'à présent demeure invisible à nos télescopes ou détecteurs de particules. Selon la taille, la masse ou la structure interne du halo, les courants stellaires seront plus ou moins longs, enroulés ou grumeleux. Les modèles et simulations de matière noire produisent des prédictions précises sur les propriétés des courants. Il en va de même d'ailleurs des théories qui se passent de particules de matière noire en évoquant des halos fantômes générés par une gravité modifiée qui ne respecterait plus tout à fait les lois de Newton aux échelles galactiques. Restent donc à confronter observations et modèles, un travail de longue haleine qui s'affine avec le flot de données récoltées par les astronomes.

In fine, les travaux futurs utilisant les structures de marée comme sondes des halos de matière noire concluront peut-être que ceux-ci sont différents de ceux imaginés et simulés aujourd'hui. Il faudrait alors réviser nos théories cosmologiques, les prédictions sur le rôle des collisions, et donc sur le nombre et le type de débris de marée qu'ils produisent. De nouvelles observations et confrontations avec les simulations deviendront nécessaires pour confirmer les nouveaux modèles. Les marées galactiques continueront longtemps à défier les astronomes. ■

Les marées dans les productions du Clea

Dans les anciens numéros des Cahiers Clairaut (<http://clea-astro.eu/archives>).

(tous les numéros de plus de 3 ans sont en libre accès sur notre site clea-astro.eu, archives des CC).

L'Éverest détrôné ou Pourquoi et comment mesurer la Terre ? CC 143 – 2 013 (les marées interviennent dans la forme de la Terre).

La limite de Roche revisitée CC 121 - 2008 (un TIPE sur la limite de Roche).

Les effets de marée dans l'univers CC 115 – 2006 (de la Lune aux galaxies).

Les marées CC 61 - 1993 (un peu de théorie).

Quand nous jouions à la marée CC 42 - 1988 (explications de base à partir d'une erreur dans un ouvrage).

L'effet de marée CC 31 – 1985 (un peu de théorie)

À propos des marées CC 27 - 1984 (les différents régimes de marée).

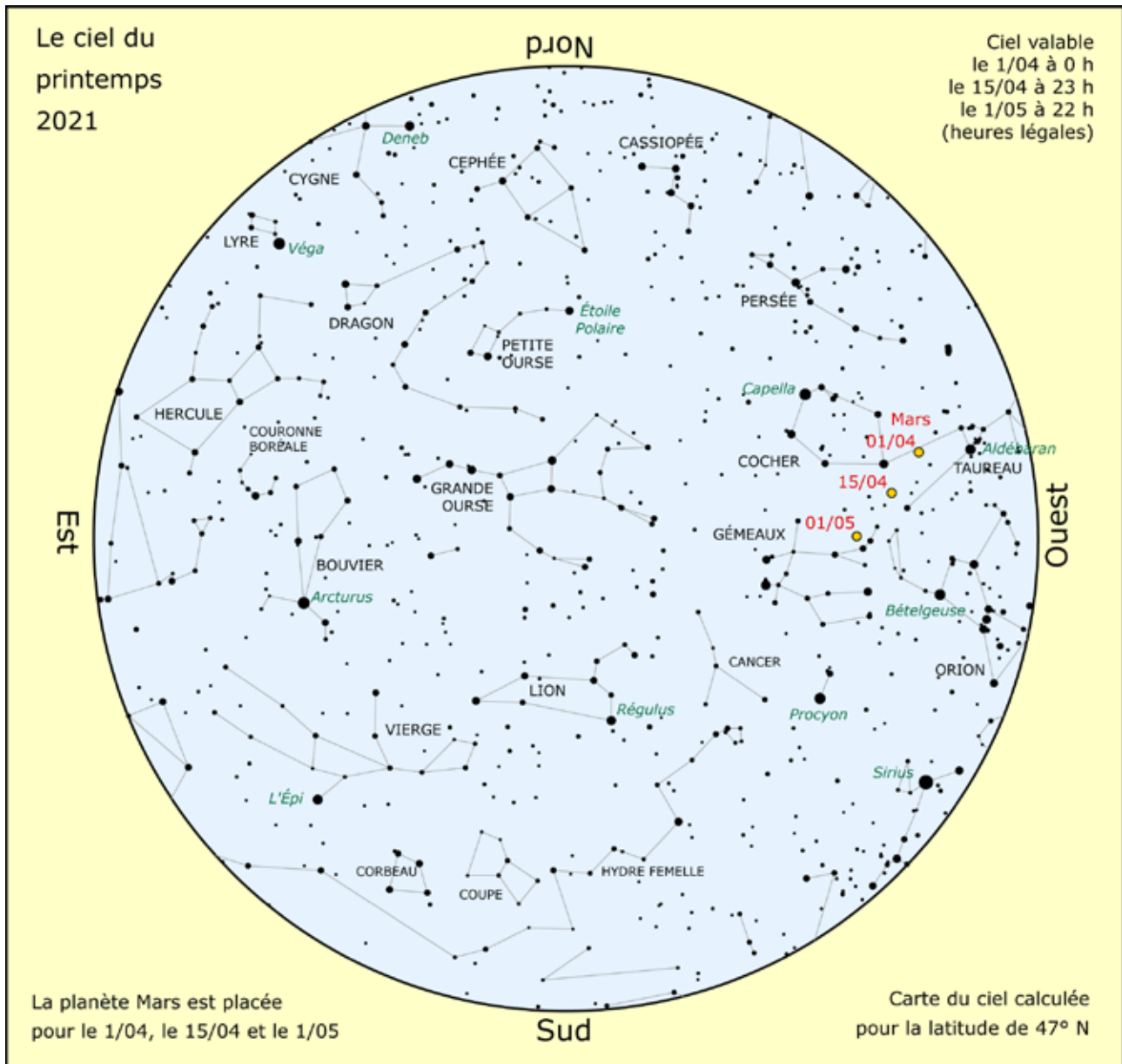
Les marées océaniques, une interprétation malheureuse CC 26 - 1984 (à propos d'erreurs dans un ouvrage)

Sur le site du CLEA (<http://clea-astro.eu>), onglet lunap puis marées

Les marées en bref.

Approfondissements : avec quelques calculs.

Activité : observations pour aboutir à l'hypothèse que la Lune est la cause probable des marées océaniques.



Visibilité des planètes

Mercury sera facile à repérer le soir en mai, pendant les deux semaines du milieu du mois (élongation maximale le 17/05). À noter son rapprochement serré avec Vénus le 28 (à 0,5°).

Vénus vient de passer derrière le Soleil. Elle réapparaît le soir mais il vaut mieux attendre la fin du printemps pour bien l'observer.

Mars continue à être observable dans le Taureau, puis dans les Gémeaux mais elle se perd dans les lueurs du couchant dès le mois de mai.

Jupiter et **Saturne** sont visibles le matin. Il faudra attendre l'été pour les observer le soir.

Quelques évènements (heures légales)

20/03 : équinoxe de printemps à 10 h 37 min.

28/03 : passage à l'heure d'été.

22/04 : maximum des Lyrides (étoiles filantes).

26/05 : éclipse totale de Lune visible depuis l'Amérique, le Pacifique, l'Australie, l'Asie.

28/05 (soir) : rapprochement serré Mercury Vénus (0,5°).

10/06 : éclipse annulaire de Soleil (nord du Canada, Russie), partielle en France.

21/06 : solstice d'été à 5 h 31 min.

Lune

Pleine Lune : les 28/03, 27/04, 26/05.

Nouvelle Lune : les 12/04, 11/05, 10/06.

L'éclipse partielle de Soleil du jeudi 10 juin 2021

La dernière éclipse partielle visible d'un peu partout en France date de mars 2015. En août 2017, quelques privilégiés de l'Ouest de la France avaient pu entrapercevoir un Soleil couchant légèrement éclipsé. Le 10 juin 2021, l'éclipse sera annulaire depuis le nord du Canada, le Groenland, le pôle Nord et le nord de la Russie.



Le 10 juin 2021, la Lune sera trop éloignée de la Terre (plus de 400 000 km) pour que son ombre atteigne la surface de notre globe. Une personne située sur la petite tache grise sur Terre verra un anneau de lumière, la Lune étant alignée avec le Soleil mais trop éloignée pour le cacher totalement.

En France métropolitaine, l'éclipse sera partielle. La fraction du disque solaire éclipsé – ce qu'on appelle l'obscurité – sera assez faible, de 18 % à Brest à 0,2 % à Ajaccio. L'heure du maximum est prévue autour de midi, heure légale. Le Soleil sera donc assez haut dans le ciel, entre 53 et 66° de hauteur. Et côté météo, le mois de juin est plutôt favorable.

Ce n'est donc pas une éclipse exceptionnelle mais suffisamment intéressante pour prévoir des observations.

Ville	Début	Milieu	Fin	Obsc.
Brest	10 h 59	12 h 00	13 h 07	18 %
Lille	11 h 14	12 h 17	13 h 23	16 %
Caen	11 h 07	12 h 08	13 h 13	16 %
Nantes	11 h 04	12 h 02	13 h 05	13 %
Paris	11 h 13	12 h 12	13 h 15	13 %
Poitiers	11 h 08	12 h 04	13 h 03	11 %
Strasbourg	11 h 26	12 h 21	13 h 20	9 %
Dijon	11 h 20	12 h 14	13 h 11	9 %
Bordeaux	11 h 07	11 h 58	12 h 54	9 %
Lyon	11 h 21	12 h 10	13 h 03	6 %
Toulouse	11 h 13	11 h 59	12 h 48	5 %
Marseille	11 h 27	12 h 06	12 h 47	3 %
Nice	11 h 33	12 h 11	12 h 50	2 %
Ajaccio	11 h 52	12 h 10	12 h 29	0,2 %

Horaires de l'éclipse et obscurité (pourcentage du disque solaire éclipsé) pour quelques villes de France, classées par ordre d'obscurité, du nord-ouest au sud-est. Les heures indiquées sont les heures légales (données issues de <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/JSEX/JSEX-EU.html>).

Comment l'observer ?

Il faut le rappeler à chaque fois, on n'observe JAMAIS le Soleil sans protection sous peine de s'abîmer sérieusement les yeux. Voici trois manières d'observer une éclipse sans danger.

1. L'observation à l'œil nu derrière un filtre certifié (comme un « Viséclipse » par exemple).

2. L'observation par projection. On projette avec une lunette ou une paire de jumelles l'image du Soleil partiellement éclipsé sur un écran ou une feuille de papier. C'est une méthode sans aucun danger à condition de surveiller en permanence que personne ne mette l'œil à l'oculaire.

3. L'observation avec un instrument, lunette ou télescope, muni d'un filtre pleine ouverture certifié, à placer à l'entrée de l'instrument (ne surtout pas utiliser les filtres qui se fixent sur l'oculaire, qui peuvent chauffer et se fendre).

Vous trouverez davantage de renseignements sur notre site (voir encadré en bas de page). Pour plus de détails, le hors-série n° 14 sur le Soleil explique comment observer et photographier le Soleil sans danger.

Que verra-t-on ?

Entre le début et la fin de l'éclipse, on verra la Lune se déplacer de droite à gauche pour obscurcir la partie nord du Soleil. Les heures sont données dans le tableau précédent, en heure légale.



à Brest à Paris à Lyon à Marseille
Le Soleil tel qu'il apparaîtra au moment du maximum de l'éclipse, vu depuis 4 villes de France.

Mesurer la distance de la Lune

Si on observe le Soleil éclipsé à la même heure depuis deux lieux éloignés, on ne verra pas la même chose. À partir de deux photos du phénomène observé depuis deux lieux éloignés et avec quelques autres données simples comme l'azimut et la hauteur du Soleil au moment de l'observation, il est possible de calculer la distance de la Lune. La méthode est expliquée sur le site du CLEA. Mais il faut être au moins deux observateurs.

Si vous voulez y participer, rendez-vous sur notre site clea-astro.eu, onglet avec nos élèves / observations.

Sur notre site clea-astro.eu à l'onglet Lunap puis Éclipse de Soleil et activités, vous trouverez :

- comment observer une éclipse de Soleil ;
- comment la photographier ;
- des idées d'activités, en particulier comment calculer la distance de la Lune à partir de deux observations.

L'observatoire Pierre Auger

Corinne Bérat, directeur de recherche au CNRS

Voilà près d'un siècle que les chercheurs ont compris que la Terre est continuellement bombardée par des particules venues du cosmos, les « rayons cosmiques ». Dans le n° 171 des Cahiers Clairaut de septembre 2020, il a aussi bien été question de l'histoire de cette découverte que de ses implications sur la naissance de la physique des particules. Qu'ils viennent du Soleil ou des confins de notre galaxie, les rayons cosmiques sont des précieux messagers de l'Univers. Dès les années 30, le physicien Pierre Auger démontrait que certaines particules de ce rayonnement atteignaient des énergies considérables.

Aujourd'hui l'Observatoire Pierre Auger1, ainsi nommé en l'honneur de ce physicien français ayant étudié, dès 1938, les grandes gerbes atmosphériques, détecte les plus énergétiques d'entre eux, et aussi les plus mystérieux : ce sont les particules les plus énergétiques de l'Univers, leur énergie pouvant dépasser les 10^{20} (des centaines de milliards de milliards) électronvolts (eV). En comparaison, les particules étudiées dans les plus grands accélérateurs, y compris celles accélérées par le grand collisionneur de hadrons au CERN2 à Genève, sont dix millions de fois moins énergétiques. D'où viennent-elles ? Quelle est leur nature ? Comment atteignent-elles des énergies aussi extrêmes ? L'objectif de l'Observatoire Pierre Auger est d'apporter des réponses à ces questions.

Les rayons cosmiques sont des voyageurs du cosmos, et sont donc des particules de durée de vie longue pour arriver ainsi jusqu'à la Terre après un trajet pouvant durer de quelques minutes jusqu'à plusieurs millions d'années. C'est pour cela qu'on trouve dans la composition des rayons cosmiques chargés électriquement des noyaux d'atomes, de l'hydrogène jusqu'au fer, ainsi que des électrons. Étant donné leur énergie, ils ne peuvent être produits que par des phénomènes astrophysiques très violents. À commencer par les réactions de fusion au cœur des étoiles comme le Soleil (le vent solaire à l'origine des aurores polaires est constitué de particules chargées), mais aussi les explosions de supernovae. Il est cependant difficile de savoir par quel objet astrophysique ont été émises les particules cosmiques détectées, car même si on peut connaître leur direction d'arrivée, celle-ci ne pointe pas vers la position du lieu d'émission. En effet, les rayons cosmiques portant une charge électrique sont déviés de leur trajectoire à cause de la force de Lorentz qu'ils subissent lorsqu'ils traversent les régions où règnent des champs magnétiques, comme il en existe dans la Voie lactée. La déviation sera faible si la zone de champ magnétique est peu étendue et d'intensité faible, ou si la particule a une énergie très élevée et une faible charge.

Depuis leur découverte, de nombreuses expériences ont permis de mesurer l'énergie de ces particules cosmiques et leur taux d'arrivée sur la Terre, et pour la plupart, leur nature. Ce qui permet d'établir ce qu'on nomme le spectre des rayons cosmiques, à savoir le

flux en fonction de l'énergie. Les caractéristiques de ce spectre sont remarquables. L'énergie mesurée s'étend sur 12 ordres de grandeur, le flux sur 32 ordres de grandeur. Pour donner une idée, il y a 12 ordres de grandeur entre l'épaisseur d'un cheveu et une distance de 100 000 km, 32 ordres de grandeur entre la taille d'un cheveu et 1 000 milliards d'années lumière !!! La décroissance du spectre indique que plus les rayons cosmiques sont énergétiques, plus leur flux est faible avec une pente telle que si on détecte des rayons cosmiques avec une énergie dix

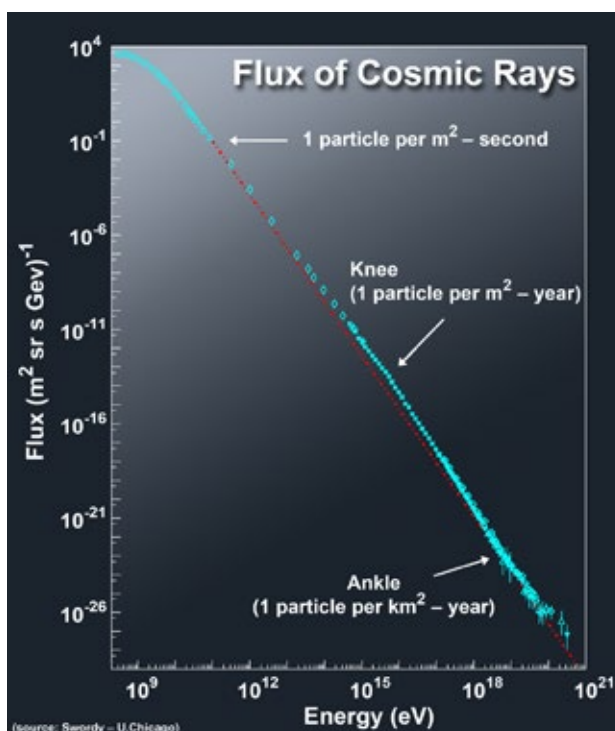




Fig.1. Une vue d'artiste d'une gerbe atmosphérique se développant au-dessus d'un détecteur de particules de l'Observatoire Pierre Auger, sur fond de ciel étoilé.

© A. Chantelauze, S. Staffi, L. Bret.

fois plus élevée, leur flux (exprimé en particule/m²/sr/s/GeV) sera environ mille fois plus faible. Ainsi, le flux de rayons cosmiques d'énergie autour de 100 GeV est de l'ordre de 1 particule/m²/s, alors que ceux d'énergie autour de 10¹⁵ sont de 1/m²/an.

Il n'est pas si simple de se rendre compte de l'incroyable quantité d'énergie que 10²⁰ eV présente pour une particule subatomique. 10²⁰ eV correspond à 16 joules : une énergie macroscopique se retrouve concentrée sur un unique noyau atomique. Pour accélérer des protons à ces énergies avec un accélérateur de particules de technologie similaire à celui du LHC au CERN¹, il faudrait une circonférence de la taille de l'orbite de Mercure ! Si dans un gramme d'hydrogène, tous les protons ont une énergie de 10¹⁹ eV alors cela équivaut à des centaines de milliers d'années d'alimentation de la France en énergie (car dans ce gramme d'hydrogène, le nombre de protons de 1,6 J est d'environ 6,02 10²³, nombre d'Avogadro). Mais de telles particules sont excessivement rares, moins de 1 par km² et par siècle, ce qui revient à beaucoup moins de 1 kWh (environ 25 Wh) par an sur la superficie de la France...

De fait, l'étude des rayons cosmiques d'ultra haute énergie est difficile car il faut faire face à des défis expérimentaux. Alors qu'on peut détecter des rayons cosmiques par des méthodes directes en utilisant des détecteurs envoyés par satellite, par ballons, ou placé sur la Station spatiale internationale (comme AMS, voir les Cahiers Clairaut n° 171), au-delà de la centaine de TeV, il devient matériellement impossible de procéder ainsi, car envoyer dans l'espace des détecteurs de plusieurs kilomètres carrés n'est pas envisageable. Étant donné leur flux extrêmement

faible, il est nécessaire de couvrir des surfaces de détection gigantesques pour collecter un grand nombre d'événements. Il faut utiliser des méthodes de détection indirecte : ces particules cosmiques sont observées en caractérisant les cascades de milliards de particules secondaires qu'elles génèrent dans l'atmosphère sous forme de grandes gerbes atmosphériques.

Une gerbe atmosphérique est une cascade de particules produite lorsqu'un rayon cosmique pénètre dans l'atmosphère (figure 1). Pour un rayon cosmique tel qu'un proton, un noyau d'atome, la première interaction se produit dans la haute atmosphère, à une vingtaine de kilomètres d'altitude. Cette première interaction produit un grand nombre de particules secondaires, qui engendrent elles-mêmes d'autres interactions : c'est toute une cascade qui est donc générée dans les premières couches de l'atmosphère ; certaines de ces particules se désintègrent, donnant naissance à des particules qui vont elles aussi interagir, tant que leur énergie est suffisante.

Plus l'énergie du rayon cosmique est élevée, plus cet effet de réaction en chaîne sera important, et plus il y aura de particules qui pourront atteindre le sol sans être absorbées dans l'atmosphère. Les muons qui sont produits dans ces gerbes avec une énergie de quelques GeV peuvent se propager jusqu'au sol en grand nombre.

Les muons sont les particules chargées les plus abondantes au niveau de la mer, en moyenne le taux est de 1 muon/cm²/min. Ce flux de muons est utilisé par les dispositifs de détection tels que le Cosmo-détecteur pour des études expérimentales dans les lycées (voir les Cahiers Clairaut n° 171).

¹ CERN : Laboratoire européen pour la physique des particules.

Les rayons cosmiques d'ultra haute énergie produisent une cascade de plusieurs milliards de particules, arrosant des surfaces de plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Et ce n'est qu'à travers cette cascade de particules secondaires qui bombardent le sol que l'on peut espérer découvrir la nature et la provenance du rayon cosmique qui l'a déclenchée, ainsi que la source de son énergie extrême.

L'Observatoire Pierre Auger

L'acte de naissance de cet observatoire a été signé en 1999 en Argentine, dans la ville de Mendoza, concrétisant huit années de gestation et de montage du projet. Quelques physiciens, emmenés par James Watson Cronin (prix Nobel de physique en 1980) de l'université de Chicago et Alan Watson de l'université de Leeds, se sont mis en tête de concevoir un observatoire gigantesque pour étudier les rayons cosmiques d'ultra haute énergie. L'idée des chercheurs est de disperser sur un vaste territoire un réseau de plus d'un millier de détecteurs régulièrement espacés pour former un capteur géant en mesure de collecter des informations précises sur ces rayons cosmiques.

L'Observatoire Pierre Auger couvre une superficie de 3 000 km² dans la Pampa Amarilla, en Argentine, par 35° de latitude sud et 65° de longitude ouest, au pied de la cordillère des Andes, à proximité de la ville de Malargüe. Le lieu a été choisi pour son étendue, sa très faible densité de population et son atmosphère claire ; de plus l'altitude d'environ 1 400 m permet de détecter les gerbes avant leur extinction. La construction de l'observatoire a débuté en 2000. L'installation complète des détecteurs s'achève en 2008, donnant naissance au plus grand observatoire jamais mis en place dans le monde, et treize ans après, il le reste toujours. Outre sa taille exceptionnelle, l'observatoire allie deux techniques complémentaires de détection des grandes gerbes atmosphériques :



Fig.2a. Un détecteur de particules à effet Cherenkov (cuve à eau de 3,6 m de diamètre).

© CNRS Photothèque / Céline ANAYA-GAUTIER.

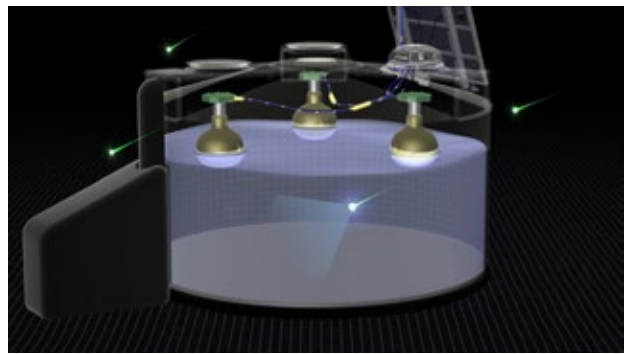


Fig.2b. Schéma d'un détecteur de particules.

- un réseau de détecteurs de particules au niveau du sol, afin d'échantillonner le profil latéral des gerbes, c'est-à-dire le nombre de particules à une certaine distance du cœur de la gerbe ;
- des télescopes à fluorescence entourant le réseau, pour mesurer leur profil longitudinal, c'est-à-dire le nombre de particules en fonction de l'altitude.

Le réseau au sol comprend 1660 détecteurs de particules, espacés tous les 1,5 kilomètre (sauf dans une zone plus dense) répartis suivant un maillage triangulaire. Chaque détecteur (figure 2) est une cuve remplie de 12 tonnes d'eau pure, utilisant l'effet Cherenkov : en pénétrant dans l'eau, les particules chargées ultrarelativistes composant les gerbes atmosphériques, telles que les électrons, positrons et muons, rayonnent par effet Cherenkov ;

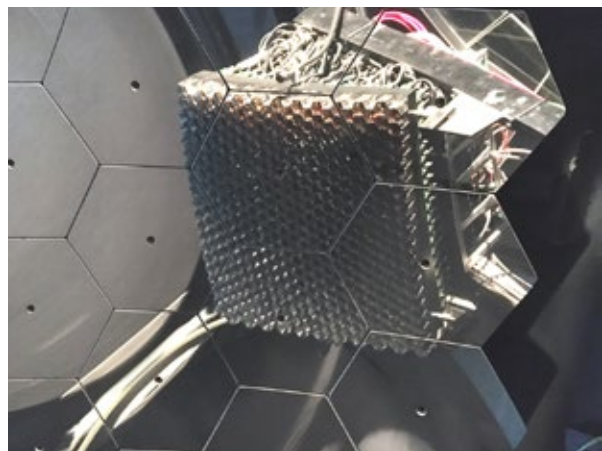


Fig.3. Télescope de fluorescence : caméra de 440 pixels constitués de photomultiplicateurs se reflétant dans le miroir (surface de 13 m²) ©Corinne Bérat.

les nombreux photons de haute énergie présents dans la gerbe produisent des paires électron-positron dans l'eau et sont ainsi détectés de manière indirecte. Le rayonnement émis est capté par trois photomultiplicateurs placés à la surface de l'eau.

Chaque cuve est autonome, alimentée par un système de panneaux solaires et batteries, et envoie les informations collectées par radio. Le réseau de surface opère avec un cycle de service quasi permanent.

L'autre technique de détection des gerbes repose sur des télescopes, ayant dans le plan focal une caméra constituée de photomultiplicateurs (figure 3) qui surveillent chacun une petite zone du ciel.

Ces capteurs détectent la lumière ultra-violette de fluorescence émise par la désexcitation des molécules d'azote à la suite de leur excitation par les nombreux électrons d'ionisation créés lors du passage dans l'atmosphère de la composante électromagnétique des gerbes. Bien que très faible (équivalent à une lampe de quelques dizaines de watts), l'émission lumineuse peut être détectée jusqu'à 30 ou 40 kilomètres de distance pendant des nuits sans Lune. Au total, 27 télescopes sont répartis sur cinq sites, et sont orientés de manière à scruter l'atmosphère au-dessus du réseau de détecteurs de particules. L'utilisation combinée des détecteurs au sol et des détecteurs de fluorescence permet d'accéder avec une grande précision aux caractéristiques des rayons cosmiques primaires (figure 4).

Aujourd'hui l'Observatoire Pierre Auger est exploité par la collaboration éponyme, rassemblant plus de 400 hommes et femmes (chercheur, ingénieur et technicien) de 17 pays qui participent à cette aventure. Les équipes françaises y ont joué un rôle important, en particulier dans la conception et la réalisation de l'électronique des détecteurs de particules et dans le système d'acquisition et de transmission des données. Celles-ci sont transférées au centre de calcul de l'IN2P3 à Lyon, où elles sont disponibles pour l'analyse par les membres de la collaboration.

Les enseignements de l'observatoire Pierre Auger

L'utilisation conjointe de ces deux ensembles de détection a permis à l'observatoire Pierre Auger de franchir un saut autant qualitatif que quantitatif qui le place à la pointe des recherches dans ce domaine d'étude.

Après une quinzaine d'années de fonctionnement, les analyses bénéficient d'une statistique importante et d'une compréhension de plus en plus précise des mesures réalisées. Cela permet d'obtenir, aujourd'hui, des résultats remarquables et des avancées scientifiques dans la connaissance de ces particules cosmiques et dans la compréhension des phénomènes de haute énergie liés aux processus les plus violents de l'Univers.

La mesure du spectre des rayons cosmiques réalisée par l'observatoire Pierre Auger couvre une grande gamme d'énergie, allant de $3 \cdot 10^{16}$ à plus de 10^{20} eV. Pour les autres gammes d'énergie sont utilisés ballons, satellites, ISS. Plusieurs particularités ont été mises en évidence comme par exemple la suppression chute brutale du flux (on parle de « suppression » du flux) pour une énergie supérieure à $5 \cdot 10^{19}$ eV. Vers 10^{18} eV l'observatoire a détecté des centaines de milliers de rayons cosmiques, alors qu'il n'en a mesuré qu'une quinzaine au-delà de 10^{20} eV. Cette suppression du flux a été prédite théoriquement en 1966, un an après la découverte du fond diffus cosmologique, empreinte du premier rayonnement émis par l'Univers 380 000 ans après le Big Bang.



Fig.4. Au second plan l'un des bâtiments qui abritent six télescopes de fluorescence, surplombant au premier plan, un détecteur de particules.

L'Américain K. Greisen ainsi que les Russes G. Zatsepin et V. Kuz'min, remarquent que les rayons cosmiques d'ultra haute énergie doivent forcément interagir avec les photons de ce fond diffus, un processus connu aujourd'hui sous le nom d'effet « GZK ».

Or une telle interaction réduit considérablement leur énergie et une particule qui atteint la Terre avec une énergie supérieure à $60 \cdot 10^{18}$ eV ne peut provenir que d'une zone de l'Univers relativement « proche », c'est-à-dire située à moins de 300 millions d'années-lumière. Il est alors possible d'interpréter la forte diminution du flux mesurée par la manifestation de l'effet GZK.

Mais il est aussi possible d'attribuer cette réduction du flux à une limite naturelle des sites astrophysiques qui accélèrent les rayons cosmiques. C'est en effet ce type de scénario dans lequel les particules sont accélérées dans l'Univers par des objets astrophysiques puissants qui est retenu pour expliquer l'origine des RCUHE (rayons cosmiques d'ultra hautes énergies). Les limites sur les flux de photons et de neutrinos d'ultra haute énergie mesurée grâce aux données de l'observatoire ont permis d'éliminer la plupart des modèles dans lesquels les rayons les plus énergétiques seraient les produits de décroissance de particules (hypothétiques) très massives.

Le spectre présente également des petites inflexions à deux autres énergies : à $5 \cdot 10^{18}$ eV inflexion déjà connue, mais aussi, pour la première fois, vers $1,3 \cdot 10^{19}$ eV.

Autant d'irrégularités qu'il faut expliquer en les reliant à des phénomènes astrophysiques ou cosmologiques.

La mesure du spectre seul ne permet pas d'en interpréter les caractéristiques observées. Il faut également connaître la nature des particules qui composent le flux mesuré. C'est le développement de la gerbe, en particulier la position de son maximum, mesuré grâce au télescope de fluorescence, qui est un indicateur de la masse de la particule à l'origine de la gerbe. Les mesures effectuées indiquent que la composition du flux s'alourdit avec l'énergie, ce qui était assez inattendu dans les scénarios envisagés avant les résultats de l'observatoire. Les études de la composition du flux ne privilégient pas une composition exclusive de protons autour et au-delà de $5 \cdot 10^{18}$ eV.

D'autres éléments plus lourds, de l'hélium jusqu'au fer, compose le flux de ces rayons cosmiques. Les résultats sont plus en accord avec un scénario où plusieurs composantes nucléaires sont présentes et dans lequel les noyaux sont accélérés jusqu'à des énergies maximales en proportion de leurs charges

électriques par les champs électromagnétiques imprégnant les environnements des sources.

Comme déjà évoqué, les champs magnétiques présents dans la Galaxie, de l'ordre du micro-gauss, courbent tellement la trajectoire des particules qu'ils empêchent l'identification directe des sources des rayons cosmiques par leur direction d'arrivée. Néanmoins, pour des énergies supérieures à 10^{18} eV, la rigidité des trajectoires des particules devient suffisamment grande pour que certaines irrégularités puissent apparaître dans les directions d'arrivée étudiées à grande échelle. L'étude de la répartition des directions d'arrivée des rayons cosmiques a ainsi fourni la preuve que les plus énergétiques viennent d'au-delà de notre galaxie. Une corrélation a même été établie entre la direction d'arrivée de rayons cosmiques d'énergie supérieure à $4 \cdot 10^{19}$ eV et la position de galaxies à flambée d'étoiles. Ces résultats constituent une avancée majeure puisque pour la première fois les rayons cosmiques d'ultra haute énergie se trouvent reliés à des phénomènes astrophysiques extragalactiques. Même si leurs sources n'ont jusqu'alors pas été identifiées de façon formelle, les nombreux résultats récents sont porteurs d'espoir quant à la possibilité de mieux comprendre leur origine.

La collaboration Pierre Auger a entrepris d'améliorer les performances de l'observatoire, pour percer le mystère de la nature et de l'origine de ces particules cosmiques, avec le projet AugerPrime, qui permettra d'apporter les éléments de réponses indispensables pour élucider cette question. L'élément clé est l'ajout de détecteurs à scintillation sur chaque cuve à eau. Pour traiter les informations délivrées par ces deux types de détecteurs, une nouvelle électronique d'acquisition et de contrôle est développée par la collaboration Pierre Auger et les laboratoires impliqués. Les nouveaux détecteurs sont en cours d'installation sur le site de l'observatoire, plusieurs sont déjà en fonctionnement. AugerPrime comprend également des détecteurs de muons enterrés dans une zone de 17 km^2 , et l'ajout d'antennes radio, pour détecter les radiations émises par les gerbes atmosphériques dans la gamme du MHz.

Avec ce programme AugerPrime, il sera bientôt possible de distinguer les composantes électromagnétique et muonique des gerbes atmosphériques. Une amélioration qui va faire gagner les mesures en sensibilité et permettre de collecter plus d'informations sur la composition en masse des rayons cosmiques aux énergies les plus élevées. Une donnée cruciale pour trancher entre les différents scénarios sur l'origine de ces particules cosmiques d'énergie incroyablement élevée.

<http://www.auger.org/>

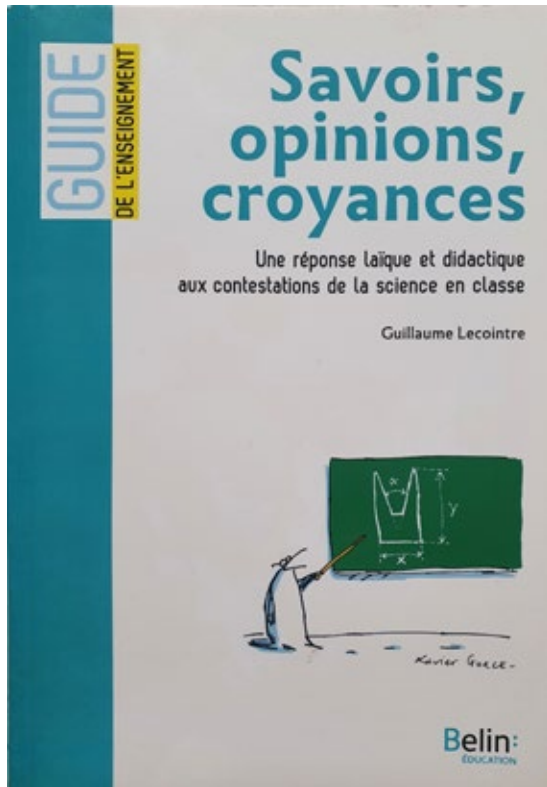
■

LECTURE POUR LA MARQUISE

Savoirs, opinions, croyances

Une réponse laïque et didactique aux contestations de la science en classe

Guillaume Lecointre (Belin)



L'auteur est professeur-chercheur au Muséum national d'histoire naturelle, directeur du département « Systématique et Évolution ».

« En France », nous dit-il, « le rôle socio-politique du chercheur trouve son sens dans la diffusion vers les publics et vers le corps enseignant ». On comprendra ainsi que son livre soit un acte militant en partie dirigé contre les « anti-évolutionnistes », créationnistes et conservatistes de tout bord, toile de fond des contestations de la science qui se multiplient dans l'espace laïque de nos établissements scolaires. Si « la légitimité du savoir réside dans son ouverture à la réfutation, la croyance (elle) est indifférente à sa potentielle réfutation », et la croyance religieuse totalement imperméable à toute réfutation (tableau p.13).

« La science a pour rôle d'expliquer rationnellement et collectivement le monde réel ». Cependant, « comme elle ne nous rassure pas, comme elle

n'explique pas tout ici et maintenant, elle se trouve discréditée ». D'ailleurs, « l'idée que la science, un jour, expliquera tout, n'est pas une idée scientifique ». Pour lutter contre ce discrédit, il s'agit « d'outiller les personnes d'un bon usage de l'esprit critique, pour analyser les croyances, déjouer les idéologies (...), mettre les savoirs à l'épreuve des faits », si l'on veut éviter « l'atomisation des représentations du monde », qui favorise « le renforcement identitaire » (le nihilisme et le complotisme).

Dans ce but, ce livre « explicite les **attendus cognitifs** minimaux des raisonnements scientifiques », au nombre de six (chap.2) : le scepticisme initial, le réalisme, la rationalité, le matérialisme méthodologique, la transparence des procédures et la prise en compte de « toutes les données disponibles et pertinentes ». Ces six attendus « forment le socle commun (...), caractérisent les sciences expérimentales et définissent la science par ses méthodes ». Ils permettent de disqualifier les créationnismes qui sont « en rupture avec au moins l'un des six attendus ». Et donc, « les enseignants peuvent utiliser ces critères de scientificité pour faire face aux contestations des contenus de l'enseignement ».

Après une charge (un peu aveugle...) contre « certains astrophysiciens » (fin du chap.4), tenants du « principe anthropique », et une intéressante analyse des différentes formes de « déni » (déni de vérité, de réalité, de langage), Guillaume Lecointre déplore qu'« on éduque principalement aux résultats de la science, pas à ses exigences cognitives, méthodes et raisonnements scientifiques eux-mêmes ». « Or, seules ces exigences pourraient déjouer l'emprise des idéologies ». Il dénonce « la confusion entre savoirs et opinions », entre « des connaissances collectivement validées » et « des opinions personnelles et privées, dont la liberté est par ailleurs garantie », garantie qui ne confère pas « légitimité à contester publiquement le contenu des savoirs ».

Et donc, « c'est aux adultes référents (...) de réaliser une articulation entre les postures métaphysiques des élèves et les savoirs acquis à l'école ». Même si le livre ne donne pas de recette « miracle » (!) pour ce faire, il ouvre vers une réflexion à mener ensemble sur les bases qu'il nous fournit. « L'esprit critique devrait être propice (...) à pacifier nos rapports sociaux, en même temps qu'il émancipe l'individu »... On peut toujours rêver...

Pourquoi la Terre est ronde ?

Alain Riazuelo (Humenscience)



Alain Riazuelo, chercheur CNRS à l'Institut d'Astrophysique de Paris, nous propose un livre, très historiquement documenté, qui va bien au-delà de son titre. La rotondité elle-même y est assez « rondement » traitée, dès le premier chapitre (La forme des astres), avec toutes les « preuves » qu'on connaît, certaines depuis « un peu plus de 2 300 ans », la course des étoiles, les différences de climat, les différences d'heures, les éclipses, Ératosthène, la gravitation, bref, pas de grandes nouveautés, mais une bonne piqûre de rappel, puis reprise dans le dernier chapitre (La preuve technologique). « Les humains ont pu, dès avant Platon, déterminer que la Terre est bel et bien ronde, avant que tout un chacun puisse le voir grâce à une petite excursion dans les airs » (Etienne Klein-Postface).

L'auteur nous présente l'histoire de l'astronomie « comme une authentique aventure », convaincu du fait qu'« **énoncer un fait scientifique sans insister sur la façon dont il a été établi n'est pas suffisant pour le faire accepter** ». Aventure qui va nous entraîner

de Barcelone à Tahiti, de l'Île Maurice en Laponie, de Cayenne à Pondichéry, au cours de laquelle nous allons croiser pas moins de 112 personnages, des plus connus (Aristote, Galilée, Newton), aux plus obscurs (Cléomède, Jérémie Horrocks, Émilie du Châtelet¹), et suivre les « mésaventures » de Christophe Colomb, confondant les « milles », de Guillaume Le Gentil à l'affût des transits de Vénus, ou de Delambre et Méchain à la recherche de l'unité de mesure « pour tous les hommes, pour tous les temps » et « pour tous les lieux »... le mètre. Pour mettre fin au liard, à la perche et à la feuille (vous connaissiez ?), et à la « journée » comme unité de surface !

Partant de la forme de la Terre, on en arrive à s'interroger sur sa taille, ses mouvements, son origine, son âge, et, par extension, sur le Soleil, la Lune, etc... Et si vous avez oublié que la Terre était née le 23 octobre de l'année - 4004, à 18 heures, la page 148 vous rafraîchira la mémoire. On comprend pourquoi Ptolémée rajouta à son modèle moult « épicycles », « pour sauver les apparences ». Ou comment la pensée d'Aristote traversa le temps sans « subir d'examen critique pendant une quinzaine de siècles, imposant à l'Occident la vision d'une Terre au centre de l'Univers », jusqu'à Galilée « qui donna le coup de grâce à la conception aristotélicienne du ciel ».

Cependant, Galilée n'apporta pas la preuve formelle que la Terre se déplaçait dans l'espace, preuve qui ne viendra qu'un siècle plus tard, avec James Bradley (l'aberration de la lumière), et encore plus tard, avec Wilhelm Bessel (les parallaxes stellaires). Quant à la rotation de la Terre, il faudra attendre 1851 et la célèbre expérience du pendule de Foucault au Panthéon...

Malgré le fait « que plus personne ne sera là pour raconter la suite », Alain Riazuelo nous décrit minutieusement une suite plutôt sombre, et qui n'en finit pas de finir, avant qu'au bout de 10^{66} années la Terre ne devienne une sphère parfaite, conforme à « l'idéal de perfection cosmique hérité de l'Antiquité grecque » !

Daniel Paupart

¹ Première traductrice en français de l'œuvre de Newton.

Un cadran solaire de berger avec du matériel de récupération

David Alberto, professeur au Havre

Une réalisation simple à mettre en œuvre avec des élèves. Même si avec certains les calculs ne sont pas abordés, la construction et l'utilisation sont très intéressantes.

Description du cadran de berger

Le cadran de berger se présente généralement sous la forme d'un cylindre vertical, surplombé d'un style horizontal.

Le style peut pivoter autour de l'axe du cylindre, afin de se positionner sur une échelle de dates horizontale située sur le bord supérieur ou inférieur du cylindre.

Des lignes horaires non rectilignes et marquées de l'heure solaire sont placées sur la face verticale du cylindre.

Une fois le style réglé à la verticale de la date, on maintient le cadran vertical (suspendu par un fil, ou posé sur une table), en orientant le style en direction du Soleil : l'extrémité de l'ombre verticale du style indique l'heure solaire.



Fig.1. Cadran de berger réalisé par l'association Méridienne de Nantes.

Un cadran « fait maison »

Un objet cylindrique pouvant tenir debout peut faire office de cadran de berger, si on place sur son pourtour une feuille rectangulaire garnie de lignes

horaires. Une tige horizontale en surplomb sert de style.

Si l'objet cylindrique n'a pas de « chapeau » ou de bouchon pouvant tourner, l'alternative est d'enrouler la feuille en la laissant libre de glisser autour du cylindre. L'utilisateur appuie sur le haut du cylindre, et fait glisser latéralement la feuille jusqu'à amener la date sous le style.

La feuille est enroulée sur le cylindre, avec ses bords opposés collés l'un sur l'autre, et non collés sur le cylindre lui-même.

Les lignes horaires doivent être tracées dans un repère orthogonal qui tient compte des dimensions du cylindre. Ces lignes dépendent de la latitude. Leur tracé fait l'objet de la suite de cet article. On en déduit la longueur du style.

On peut trouver différents formats de canettes de soda. Le format apparu ces toutes dernières années (58 mm × 145 mm) est plus étroit et plus haut que le format « classique » qui prévalait auparavant (66 mm × 115 mm). Il se trouve que les proportions de ce nouveau format sont plus proches de celles des cadrans de berger que l'on peut voir dans des musées. C'est donc un objet idéal pour servir de cadran de berger.

On peut remplir la canette vide de sable ou de petit gravier pour lester le cadran en cas de vent, pour un usage extérieur.

Un agitateur en bois ou en plastique, une pique de brochette, ou encore une paille, n'attendaient que cette occasion pour échapper à la poubelle et se recycler en styles pour cadran solaire.

De la pâte adhésive (Patafix, Blutack,...) permet de fixer le style sur la partie supérieure de la canette.

Le style doit être bien horizontal, et surplomber la feuille de lignes horaires de la longueur exacte prévue par les calculs du tracé.

Le fichier proposé en accompagnement de cet article fournit le tracé des lignes horaires pour différentes latitudes couvrant la France métropolitaine. Ainsi, il n'est pas nécessaire de savoir construire les lignes horaires pour confectionner ce cadran. Des personnes encadrant des enfants (école primaire, atelier astronomie) peuvent fournir le matériel et les instructions de montage.



Fig.2. Le cadran de berger finalisé.

Un cadran de hauteur

Ce cadran permet de déterminer l'heure solaire à partir de la hauteur du Soleil : c'est donc un cadran de hauteur.

Les paramètres astronomiques

La relation (1) entre la hauteur et l'angle horaire du Soleil est :

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(Ah) \quad (1)$$

où :

h est la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon

φ est la latitude du lieu

δ est la déclinaison du Soleil (dépend de la date)

Ah est l'angle horaire du Soleil (0° à midi, 15° pour 11 heures et 13 heures, 30° pour 10 heures et 14 heures...)

Pour une latitude et une date données, la hauteur h est nulle au lever du Soleil ; elle est maximale à midi (solaire), puis redevient nulle au coucher.

En un lieu donné, la hauteur du Soleil dépend de la date, c'est pourquoi l'utilisateur doit commencer par fixer la date du jour.

Dans le triangle formé par la pointe du style, son point de fixation et l'extrémité de son ombre dans un plan vertical, on a la relation (voir figure 3) :

$$\tan(h) = \frac{b}{l} \text{ soit } : b = l \cdot \tan(h) \quad (2)$$

où b est la longueur de l'ombre

et l la longueur du style

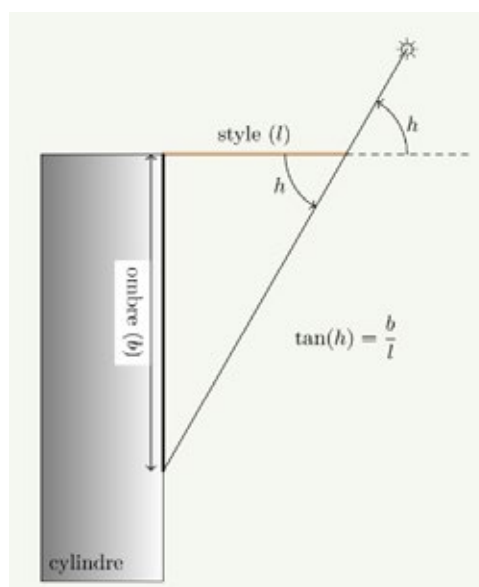


Fig.3. Relation trigonométrique entre la hauteur du Soleil et la longueur de l'ombre.

Choix de la longueur du style

L'ombre du style sera maximale à midi solaire, au solstice d'été. Par conséquent, la ligne horaire « midi » de ce jour a la plus grande amplitude et détermine l'échelle sur l'axe vertical sur le cylindre.

La hauteur méridienne du Soleil (h_m) s'exprime simplement en fonction de la latitude φ et de la déclinaison δ :

$$h_m = 90^\circ - \varphi + \delta$$

D'après la relation

$$b = l \cdot \tan(h) \quad (2)$$

on obtient une expression de la longueur maximale du style, en fonction de la hauteur du cylindre (en prenant $\delta = 23,45^\circ$):

$$l_{max} = \frac{\text{hauteur du cylindre}}{\tan(90^\circ - \varphi + \delta)}$$

$$l_{max} = \frac{\text{hauteur du cylindre}}{\tan(113,44^\circ - \varphi)}$$

Afin d'éviter que la feuille ne frotte sur le support, et de laisser une place pour le calendrier au pied du cadran, la hauteur utile de la canette a été prise ici à 135 mm sur les feuilles à imprimer.

Un style long a l'avantage de limiter le resserrement des lignes horaires en hiver.

Cependant, moins la latitude est grande, plus le Soleil est haut dans le ciel en été, et plus la longueur du style doit être petite (Tableau 1).

Latitude	longueur maximale du style (mm)
49°	65
47°	59
45°	53
43°	48
41°	43

Tableau.1. Longueur maximale du style, pour une canette de hauteur utile de 135 mm.

Dans le fichier qui accompagne cet article, les lignes horaires ont été tracées pour 10 latitudes, de 42° à 51° (fichier sur le site). La hauteur utile et la longueur du style ont été optimisées pour chaque latitude.

Calcul des lignes horaires

Les lignes tracées sur le cadran doivent donner la valeur de la longueur b de l'ombre du style en fonction de la date (plus précisément de la déclinaison du Soleil calculée à partir du quantième du jour de l'année J , de 1 à 365) (Relation 3).

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (284 + J)\right) \quad (3)$$

La figure 4 représente la variation de la déclinaison du Soleil au cours de l'année, selon la modélisation :

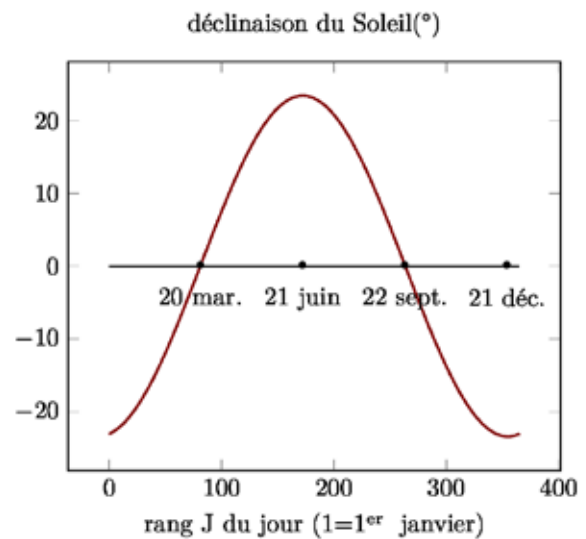


Fig.4. Variation de la déclinaison au cours de l'année.

La Fig.5 représente la variation de la longueur de l'ombre du style au cours de l'année. Ce sont les lignes horaires qui doivent figurer sur le cylindre du cadran de berger.

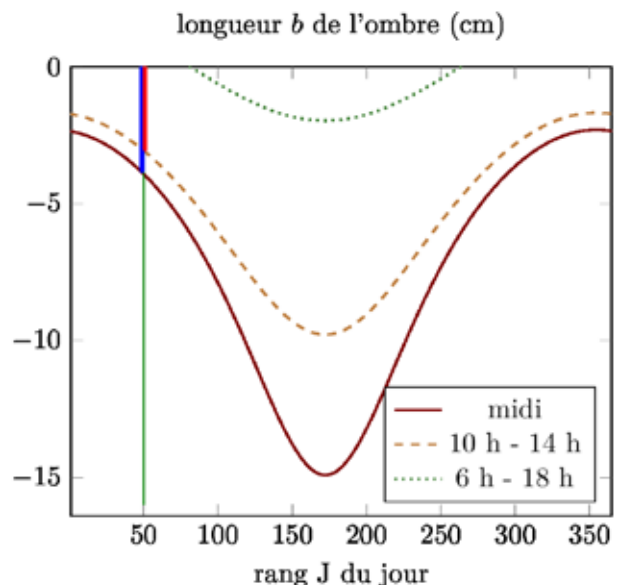


Fig.5. Quelques lignes horaires du cadran de berger (latitude 47°, style de 6,5 cm).

À Nantes (latitude : 47°) le 50^e jour de l'année, soit le 19 février, l'ombre du style est sur le trait vertical vert.

Cette ombre est le trait bleu à midi ou le trait rouge à 10 heures du matin ou 14 heures de l'après-midi.

Ce jour-là, l'ombre ne peut pas atteindre la ligne de 6 h – 18h, car le Soleil n'est pas levé à 6 heures du matin et est déjà couché à 18 heures.

Pour obtenir ces lignes, on doit combiner les trois égalités évoquées plus haut, pour exprimer la longueur b de l'ombre en fonction du rang J du jour dans l'année :

$$h = \arcsin[\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(Ah)] \quad (1)$$

$$b = l \cdot \tan(h) \quad (2)$$

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (284 + J)\right) \quad (3)$$

Pour une latitude donnée, la ligne horaire $L12$, est la courbe de b en fonction de J , pour $Ah = 0^\circ$ en prenant comme longueur l du style une longueur inférieure ou égale à l_{\max}

On obtient de même $L11-13$, la ligne horaire pour $Ah = 15^\circ$, et ainsi de suite...

Les caractéristiques d'un cadran de hauteur

Une même ligne horaire correspond à deux heures différentes, également espacées par rapport au midi solaire. En effet, excepté à midi, il existe deux moments dans la journée où le Soleil atteint la même hauteur au-dessus de l'horizon.

Ceci est une caractéristique inhérente à tous les cadrans de hauteur. La conséquence la plus importante est que l'utilisateur souhaitant lire l'heure doit déjà savoir si midi solaire est déjà passé ou non¹.

Un autre inconvénient des cadrans solaires de hauteur est leur imprécision notable autour de midi solaire. En effet, à midi, la courbe de hauteur présente un maximum très arrondi : la hauteur varie très peu pendant un intervalle de temps assez long. L'utilisateur est donc invité à la plus grande clémence pour la détermination de l'heure entre 11 h et 13 h (heure solaire).

Une dernière caractéristique des cadrans de hauteur : on y lit directement les heures de lever et de coucher du Soleil pour une date donnée. En effet, à ces instants, la hauteur du Soleil étant nulle, l'ombre n'a pas de longueur ; la ligne horaire arrivant au sommet du tracé (sous le style) à une date donnée indique donc ces heures de lever et de coucher.

¹ Ce qui peut amener quelques confusions, si le midi selon l'heure légale est déjà passé, mais pas le midi solaire.

Tracé du calendrier

Dans le cadran proposé ici, le calendrier a été placé sur le bord inférieur de la feuille.

Pour pouvoir aligner facilement le style sur la date voulue, des lignes verticales graduent de bas en haut le calendrier (1^{er} jour du mois, ainsi que les 11^e et 21^e jours).

Le calendrier couvre la quasi-totalité du périmètre du cylindre. Pour un diamètre de 58 mm, on obtient un périmètre proche de 180 mm, soit 15 mm par mois, ou 1 mm pour 2 jours, ce qui donne une estimation de la limite de précision sur la date.

Exploitation avec des élèves

La réalisation de ce cadran peut constituer une activité au sein d'un atelier astronomie. Si les élèves testent jour après jour le fonctionnement de ce cadran, ils assimilent plus concrètement les variations journalières et annuelles de la hauteur du Soleil.

À l'occasion de la fête de la science 2019, des élèves de Première STL du lycée Françoise de Grâce, au Havre, proposaient au public visitant leur stand de confectionner sur place un cadran de berger, en fournissant les feuilles de lignes horaires, les canettes et les agitateurs en plastiques (récupérés après une campagne de collecte au sein du lycée).

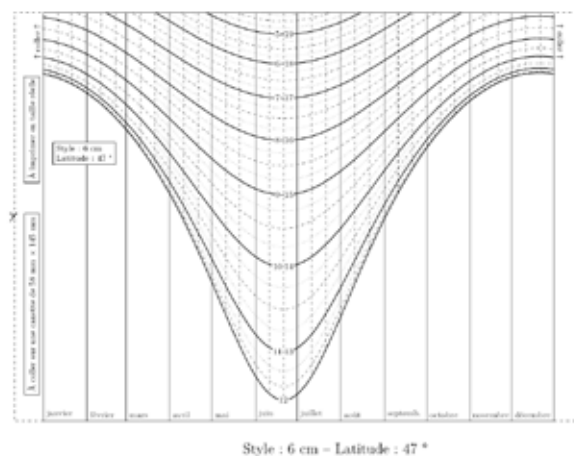


Fig.6. Le tracé complet, à imprimer en taille réelle et à découper.

Vous trouverez sur le site du CLEA dans les compléments au CC173 les tracés d'un cadran pour plusieurs latitudes.



Colloque AstroEdu-FR (7-9 janvier 2021)

Frédéric Pitout, IRAP Toulouse

En ce tout début d'année 2021, et malgré la situation sanitaire que nous traversons toujours, le colloque dédié à l'astronomie dans l'éducation s'est tenu à distance. Plusieurs organismes et associations, dont le CLEA, ont allié leur énergie pour mettre en place un moment d'échange entre trois communautés : les éducateurs au sens large (enseignants et médiateurs), les astronomes et les chercheurs en didactique et psychologie de développement. Les buts de colloque étaient multiples :

- Faire un état des lieux des pratiques, des ressources, des besoins et des formations ;
- Créer une dynamique et une communauté durable autour de l'astronomie pour l'éducation dans l'espace francophone ;
- Rédiger un livre blanc contenant une synthèse, des propositions pour les tutelles et une prospective pour la communauté en devenir.

Réparti sur 3 jours, dont un samedi pour permettre aux enseignants de participer au moins en partie, le colloque a attiré 260 inscrits.

De manière pratique, chaque journée fut dédiée à un thème particulier : « l'astronomie pour

l'éducation » le jeudi, « les pratiques enseignantes, éducation formelle et informelle » le vendredi et « la formation » le samedi. Chaque journée commençait par une matinée en plénière, dont une table ronde le jeudi matin pour poser les bases du colloque : pourquoi l'astronomie dans l'éducation ? Les après-midi, les participants pouvaient choisir deux ateliers parmi quatre dans lesquels était davantage débattu le « comment », via des retours d'expérience, des études, etc.

En ce qui concerne le CLEA, notre association a été bien visible et bien représentée pendant le colloque : plusieurs adhérents ont participé ou sont intervenus à tous les moments clés : en amont au cours de la phase de préparation, lors de la table ronde et pendant les ateliers. Par ailleurs, il est agréable et gratifiant de noter que le CLEA est revenu à de nombreuses reprises dans les discussions, preuve que notre travail est connu et reconnu !

Malgré le fait qu'il se tenait à distance, le colloque fut une belle réussite et laisse entrevoir des suites fructueuses et prometteuses dans lesquelles le CLEA a naturellement toute sa place.

École d'été d'astronomie

L'école d'été d'astronomie du CLEA devrait se dérouler du mercredi 18 au mardi 24 août 2021, au col Bayard à proximité de Gap.

Nous ne savons pas dans quelles conditions elle pourra avoir lieu. Surveillez le site du CLEA pour avoir les dernières informations et les dates d'inscription.

Dès que nous aurons quelques certitudes des informations seront données via la liste de diffusion du CLEA et le site..

Solutions des mots croisés de la page 23

Horizontalement

1. Coefficient. 2. ET. Ulna. Top. 3. Newton. Me. 4. Antennes. 5. Vives-eaux. 6. Inès. Su. Pas. 7. nc. SHOM (Service hydrographique et océanographique de la Marine). 8. Galaxies. Io. 9. Tsigane. Mer.

Verticalement

1. Cent-vingt. 2. Ôte. Incas. 3. Wave. Li (3, le n° de l'élément lithium ou LI, 51 en chiffres romains ou 576 m pour le li chinois). 4. Futnes. AG. 5. Flots. Axa. 6. Innées. In. 7. Ça. Nausée. 8. ONU. HS. 9. Et. Expo. 10. Noms. Amie. 11. TPE. Os. Or.