

porelle, avec une toute petite cible et des émissions qui durent quelques nanosecondes, des systèmes spécialement conçus s'imposent. L'acquisition des données devra être automatique, comme elle l'est déjà pour *Phébus* ; leur transposition au laser *Mégajoules* posera surtout le problème du «durcissement» des systèmes à toutes les sources de bruit dues aux rayonnements intenses provoqués par les réactions de fusion.

Le laser *Mégajoules* constitue un élément clé du programme de simulation destiné à maintenir une capacité de dissuasion nucléaire, après l'arrêt définitif des essais, décidé en 1996. Après le laser *Phébus*, en exploitation depuis dix ans, il provoquera des réactions de fusion, en concentrant dans un temps très bref une forte quantité d'énergie sur une microcible. Les dimensions millimétriques de cette dernière ne sont en rien comparables à celles d'un engin nucléaire, mais les valeurs obtenues par certains paramètres (température et densité) sont dans la gamme intéressante pour la compréhension des phénomènes caractéristiques du domaine thermonucléaire. Le laser *Mégajoules* fera aussi progresser l'ensemble de la physique des plasmas denses, présents aussi bien dans l'espace que dans des futures centrales de production d'énergie civile. Sa construction est échelonnée dans le temps : la première étape est la construction de la ligne d'intégration laser, entreprise dès 1996.

Jacques COUTANT a dirigé, de 1986 à 1995, le Département Laser et physique du plasma, au Centre CEA de Limeil-Valenton.

La fusion thermonucléaire inertielle par laser (5 volumes), édité sous la direction de Robert Dautray et de Jean-Paul Watteau, Collection CEA, Éditions Eyrolles, 1993.

Energy from inertial fusion, document édité par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, Vienne, 1995

Les déchets nucléaires, sous la direction de René Turlay. Dossier scientifique de la Société française de physique, 1997.

Nuclear Fusion by Inertial Confinement, sous la direction de G. Velarde, Y. Ronen et J. Martinez-Val. CRC Press, 1993.

Chocs, revue scientifique et technique de la Direction des applications militaires, n°13, avril 1995.



Les avancées scientifiques

Avec
l'École Polytechnique,
une mise en commun
des expériences,
source de réflexions,
riche d'échanges
et de rencontres

Décembre

Modélisation numérique des écoulements fluides non newtoniens	3, 4, 5
Migration vers l'objet et réutilisation des composants logiciels	10
Caractérisation des matériaux par ellipsométrie	11, 12
Approche probabiliste de la fatigue : ponts métalliques et mixtes	18, 19
Analyse quantitative, non destructive par la RMN	19

Janvier- Février

Recherche amont dans le secteur de la Défense	8, 9
Principes et application des réseaux neuronaux	12, 13
Robotique et apprentissage	14, 15
Les lasers mégajoules	15
Thérapie génique et maladies du sang	16
Applications industrielles des lasers de puissance	20
Pour les systèmes multicapteurs, la fusion de données	26, 27 jan. et 2, 3 fév.
Microscopie et analyse à l'échelle nanométrique	29, 30

Mars

Modélisation numérique des écoulements fluides	4, 5, 6
Les entrepôts de données : pourquoi, comment, avec quelles données?	5
Les gels : formation, structure et propriétés	10
Calcul des pièces métalliques à la fatigue	11, 12, 13
Calcul formel : possibilités et applications	12
Transformée en ondelettes : ses applications	16, 17
Génération et mise en forme des solides divisés	18, 19, 20
Modélisation en acoustique et électromagnétisme	23, 24, 25
L'électronique de demain	25, 26, 27
Internet, Intranet, commerce électronique : qu'en est-il de la sécurité?	31

Le Collège propose des séminaires conçus pour des ingénieurs et scientifiques sur tout l'environnement des sciences et des techniques, de la R&D, par exemple : la mémoire d'entreprise, le transfert de technologie, l'intelligence économique, la veille technologique, les estimations paramétriques des projets, le commerce électronique, la négociation, l'animation et la cohésion des équipes techniques...

Le Collège conçoit, propose et organise également des séminaires et des cycles de conférences pour répondre à une demande d'entreprises.

**Catalogue disponible
sur demande**

Collège de Polytechnique

CNIT - BP 230

2, place de la Défense

92503 PARIS LA DÉFENSE

Tél : 01 46 92 21 49 - Fax : 01 46 92 21 60

e.mail : collegex@poly.polytechnique.fr

Ecole polytechnique [http : // www.polytechnique.fr](http://www.polytechnique.fr)

Mercure, la planète oubliée

ROBERT NELSON

Malgré sa proximité, ce monde étrange nous est presque inconnu.



1. MERCURE reçoit dix fois plus de lumière solaire que la Terre. Les éruptions de la couronne solaire se détachent sur l'horizon. Cette représentation, fondée sur les données récoltées au cours de la mission *Mariner 10*, montre l'escarpement Discovery, à droite. Dans le ciel, on aperçoit une planète bleue et sa lune.



Mercure, la planète la plus proche du Soleil, est un monde d'extrêmes. De tous les objets du Système solaire, c'est celui qui s'est condensé à la température la plus élevée à partir de la nébuleuse primitive. Sur Mercure, un cycle diurne dure plus de 176 jours terrestres : c'est le jour le plus long du Système solaire (il correspond à deux années mercuriennes). Quand la planète est à son périhélie (le point de l'orbite le plus proche du Soleil), elle se déplace si rapidement qu'une personne y contemplant le Soleil aurait l'impression qu'il est arrêté dans le ciel : la vitesse de rotation de Mercure sur elle-même devient égale à sa vitesse de révolution autour du Soleil. Pendant la journée, la température au sol atteint 430 °C : sur aucune autre planète, on ne mesure une telle température, bien supérieure à la température de fusion du plomb. La nuit, en revanche, la température descend à -173 °C : le krypton y serait solide.

Ces particularités excitent la curiosité des astronomes, parce qu'elles semblent difficilement compatibles avec les théories de l'évolution du Système solaire. Mercure est un bon test pour les théories astronomiques. Bien que cette planète soit, après Mars et Vénus, la plus proche de la Terre, seule la lointaine Pluton est moins bien connue. L'origine de Mercure, son évolution, son étonnant champ magnétique, son atmosphère ténue, son éventuel noyau liquide et sa densité anormalement élevée : toutes ces caractéristiques sont des énigmes.

Mercure brille intensément, mais les premiers astronomes ne distinguaient aucun détail à sa surface. Ils devaient se contenter de relever son mouvement dans le ciel. Vue de la Terre, Mercure ne s'écarte jamais de plus de 27 degrés du Soleil (c'est l'angle des aiguilles d'une montre, quand il est une heure) : on peut l'observer durant la journée, mais l'observation est perturbée par la lumière du Soleil diffusée par l'atmosphère terrestre. On peut aussi l'observer avant le lever ou après le coucher du Soleil, quand l'astre est juste derrière l'horizon ; toutefois, au crépuscule, Mercure est très bas sur l'horizon, de sorte que sa lumière traverse des couches d'air turbulent dix fois plus épaisses qu'au cours d'une observation directe, quand la planète est au zénith. Avec les meilleurs télescopes terrestres, seuls les accidents du relief qui s'étendent sur plusieurs centaines de kilomètres sont visibles (alors qu'on distingue le relief lunaire à l'œil nu).

Une journée de deux ans

Malgré les difficultés, l'observation au télescope a fourni quelques résultats intéressants. En 1955, des astronomes ont émis des ondes radar vers la surface de Mercure et enregistré les échos ; en mesurant le décalage Doppler des fréquences des ondes réémises, ils ont découvert que la période de rotation de la planète sur elle-même est égale à 59 jours terrestres (l'effet Doppler se perçoit quand on croise une ambulance : on entend une variation de la hauteur du son). Des observations antérieures indiquaient que la période de rotation était égale à 88 jours, ce qui correspond en fait à une révolution complète de Mercure autour du Soleil ; en fait, bien que la durée de la rotation soit égale à 59 jours, il faut 176 jours pour qu'un point de la surface de Mercure se retrouve exactement dans la même position par rapport au Soleil.

Si la période de rotation était égale à la période de révolution, la planète aurait toujours la même face exposée au Soleil. Toutefois, le rapport entre une année et une journée de Mercure est égal à deux tiers. Mercure, qui jadis tournait beaucoup plus vite qu'aujourd'hui, dissipait probablement de l'énergie par effet de marée (les corps célestes se boursoufflent selon l'axe du corps qui les attire) ; elle a alors ralenti, et le rapport entre la durée d'une journée et celle d'une année s'est figé à la valeur mesurée aujourd'hui.

Les nouveaux observatoires spatiaux, tel le télescope spatial *Hubble*, semblent être des outils de choix pour l'étude de Mercure, car les observations ne sont pas perturbées par les mouvements de l'atmosphère. Malheureusement, ni *Hubble*, ni la plupart des autres sondes spatiales ne peuvent pointer en direction de Mercure, car la

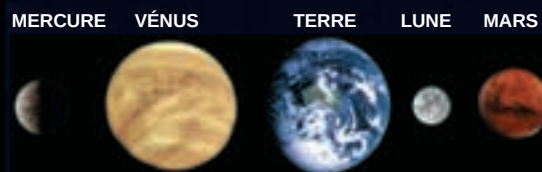
Mercure est la planète la plus proche du Soleil. Son orbite est excentrique et inclinée par rapport au plan de l'écliptique (le plan de rotation de la Terre). Elle fait une révolution autour du Soleil en 88 jours terrestres. Comme elle tourne très lentement sur son axe, une journée de Mercure (176 jours terrestres) s'étend sur deux années de la planète. En raison de la proximité du Soleil et de la durée d'une journée, Mercure a la température diurne la plus élevée du Système solaire.

La planète, un peu plus grosse que la Lune, a une surface rocheuse parsemée de cratères. Elle est exceptionnellement dense, car son noyau est en fer. Elle a un champ magnétique intense : son noyau serait partiellement liquide. On s'interroge sur l'origine de la petite planète, car elle aurait dû refroidir suffisamment pour être entièrement solidifiée depuis longtemps.

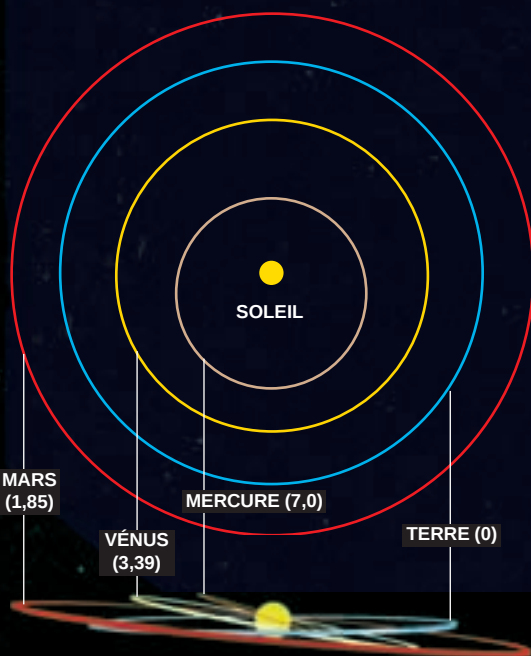
Le champ magnétique de Mercure forme une magnétosphère qui protège partiellement la surface de l'intense vent de protons émis par le Soleil. Son atmosphère ténue est constituée de particules recyclées par le vent solaire ou éjectées de la surface.

Malgré toutes les questions que pose encore cette planète, un seul vaisseau spatial, *Mariner 10*, est allé explorer Mercure.

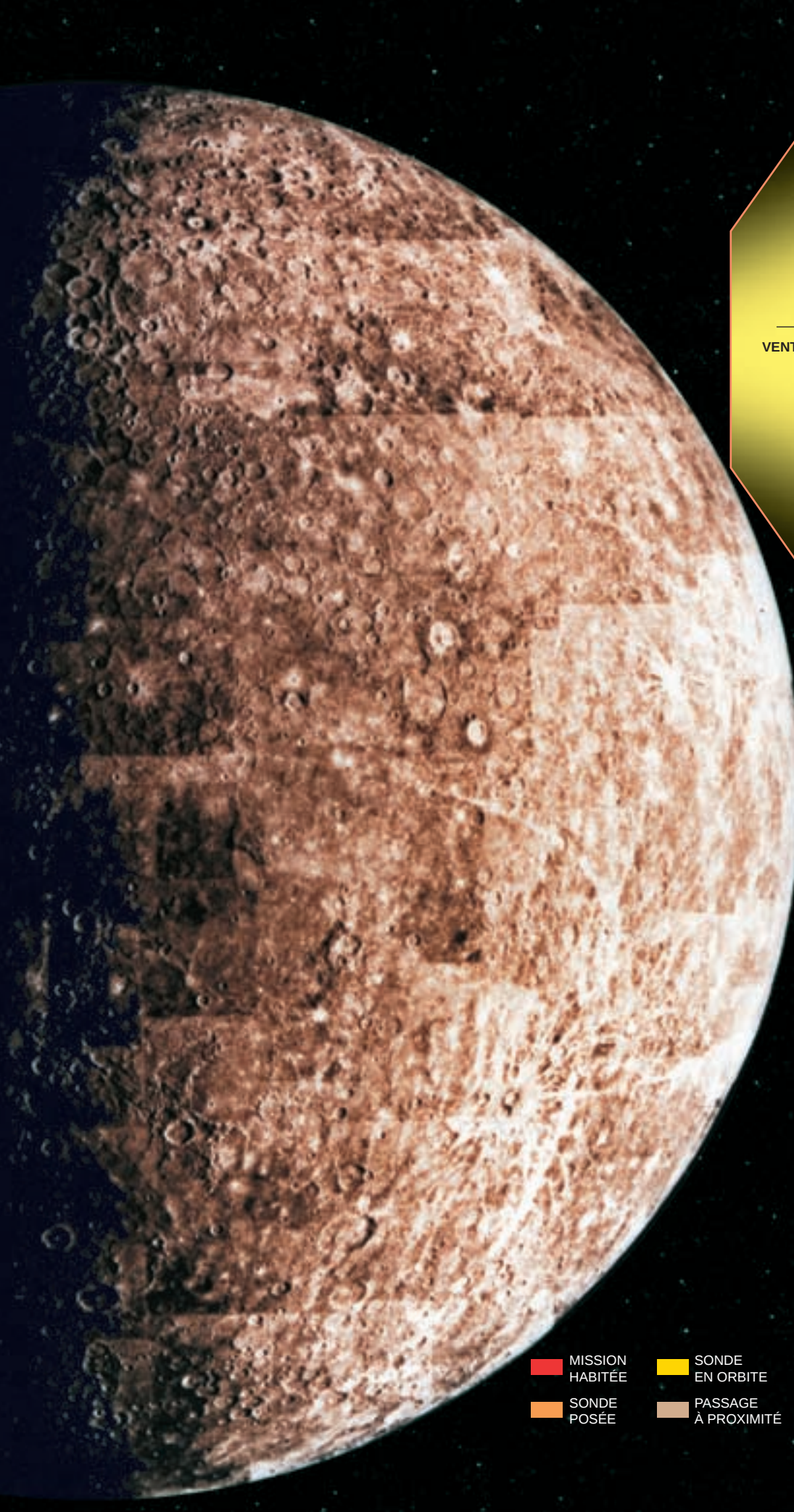
TAILLES RELATIVES DES CORPS TELLURIQUES



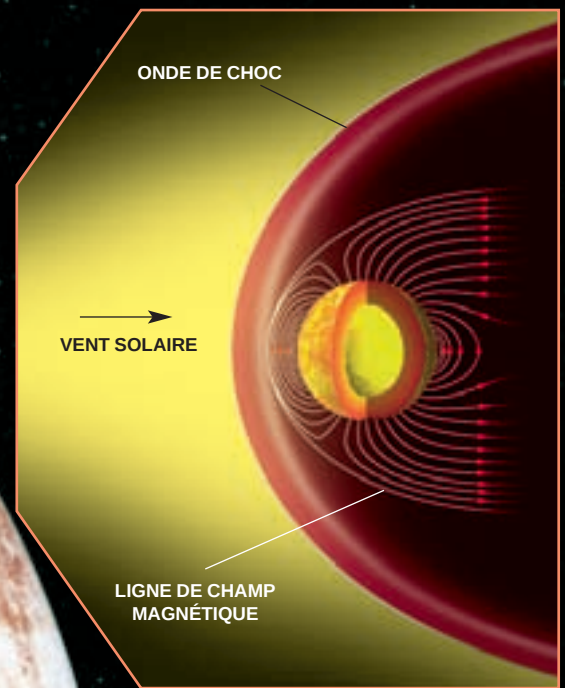
ORBITES RELATIVES DES CORPS TELLURIQUES (Inclinaison en degrés du plan de leur orbite)



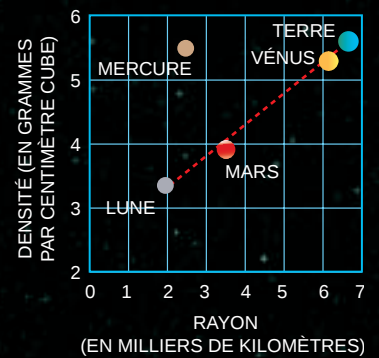
Photographie : NASA. Dessins : Slim Films



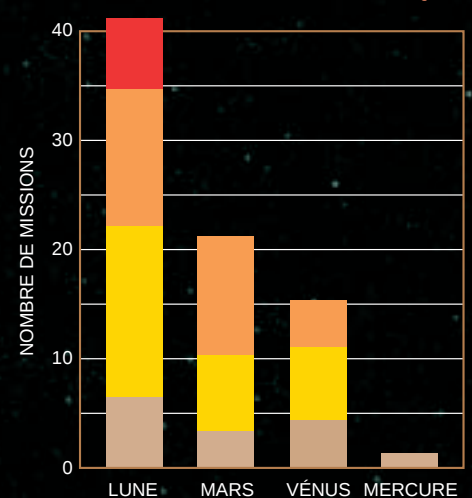
MAGNÉTOSPHÈRE DE MERCURE



DENSITÉ DES CORPS TELLURIQUES



MISSIONS VERS LES CORPS TELLURIQUES



- MISSION HABITÉE
- SONDE EN ORBITE
- SONDE POSÉE
- PASSAGE À PROXIMITÉ

lumière du Soleil, trop proche, risquerait d'endommager les instruments d'optique, très sensibles, embarqués à bord.

Pour percer les secrets de Mercure, il n'y avait qu'une solution : l'envoi d'une sonde spatiale qui passerait à proximité. Un seul engin a fait le voyage : *Mariner 10*, qui explorait le Système solaire, dans les années 1970. Le calcul de la trajectoire de la sonde a été difficile, car il a d'abord fallu que la sonde passe à proximité de Vénus, qu'elle utilise l'attraction gravitationnelle de cette planète pour infléchir sa trajectoire et qu'elle perde de l'énergie ; la modification de la taille de l'orbite de *Mariner 10* a permis à la sonde de se rapprocher suffisamment de Mercure. Trois fois l'orbite de *Mariner 10* a frôlé Mercure : le 29 mars 1974, le 21 septembre 1974 et le 16 mars 1975. La sonde a photographié près de 40 pour cent de la sur-

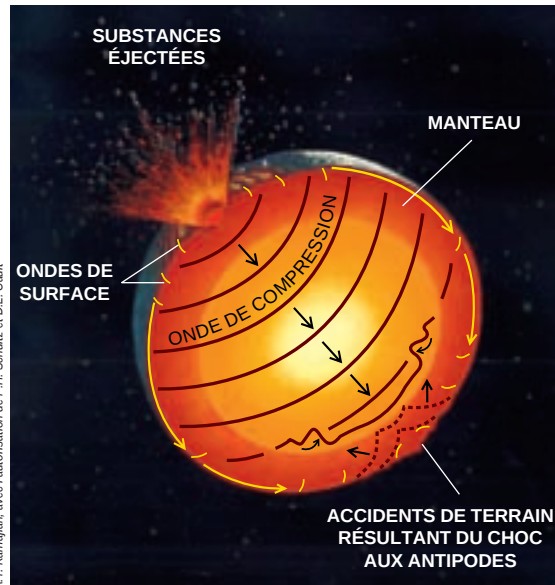
face de la planète, révélant de nombreux cratères, qui ressemblent à ceux de la Lune.

Ces photographies ont donné l'image trompeuse d'une planète qui n'aurait différé de la Lune que par sa

localisation ; aussi fut-elle la planète oubliée du programme spatial américain. Plus de 40 sondes ont été envoyées vers la Lune, 20 vers Vénus et plus de 15 vers Mars. D'ici l'an 2010, plusieurs vaisseaux spatiaux seront mis en orbite autour de Vénus, de Mars, de Jupiter et de Saturne, transmettant des données précises sur ces planètes et sur leur environnement, que les astronomes mettront des années à dépouiller. Mercure ne sera guère explorée.

La question du fer

La quasi-totalité des informations dont nous disposons aujourd'hui sur Mercure vient de la mission *Mariner*. Les instruments embarqués ont transmis quelque 2 000 images, avec une résolution de l'ordre de 1,5 kilomètre, comparable à celle des photographies de la Lune obtenues de la Terre avec un télescope puissant. Malheureusement, seule



2. LE BASSIN CALORIS a été creusé par un énorme corps qui a heurté Mercure il y a environ 3,6 milliards d'années. Les ondes de choc se sont propagées dans la planète, créant des escarpements et des accidents de terrain aux antipodes de l'impact. Autour du bassin

Caloris, les ondes concentriques de déformation se sont solidifiées après l'impact. Le centre du cratère (1 300 kilomètres de diamètre) a été aplani par les laves qui se sont déversées après l'impact, puis solidifiées. Depuis, d'autres cratères plus petits s'y sont formés.

une des faces de Mercure a été photographiée. L'autre reste inconnue.

En mesurant l'accélération de *Mariner 10* dans le champ gravitationnel intense de Mercure, les astronomes ont confirmé que sa densité est anormalement élevée. Les autres corps planétaires telluriques (non gazeux), tels que Vénus, la Lune, Mars ou la Terre, ont une densité proportionnelle à leur taille. Les plus grands, la Terre et Vénus, sont denses ; les autres, plus petits, tels que la Lune et Mars ont des densités inférieures. Mercure n'est guère plus grosse que la Lune, mais sa densité est proche de celle de la Terre.

Cette observation renseigne sur la composition de Mercure. Les couches externes de la Terre sont constituées de matériaux légers, de silicates, par exemple. La densité augmente avec la profondeur, car les roches, comprimées par les couches supérieures, ont une composition différente. Les noyaux denses des planètes telluriques sont essentiellement constitués de fer.

Proportionnellement, Mercure a sans doute le noyau métallique le plus volumineux de toutes les planètes telluriques. Cette caractéristique a alimenté des débats animés sur l'origine et l'évolution du Système solaire. Si l'on admet que toutes les planètes se sont formées quasi simultanément à partir de la nébuleuse primitive, on peut proposer trois hypothèses pour expliquer les caractéristiques de Mercure : soit la nébuleuse primitive avait eu une composition différente au voisinage de la trajectoire de Mercure (la différence aurait été bien supérieure à celle prévue par les modèles) ; soit le rayonnement émis par le Soleil était si intense, au début du Système solaire, que les éléments les plus volatiles et les plus légers de Mercure ont été vaporisés et éliminés ; soit, enfin, un objet massif a heurté la planète tout juste formée, et les matériaux les moins denses ont été vaporisés. Les preuves sont encore insuffisantes pour valider l'une de ces trois hypothèses.

De surcroît, ni les données transmises par *Mariner 10*, ni les observations spectroscopiques faites de la Terre n'ont permis aux astronomes de détecter ne serait-ce que des traces de fer dans la croûte rocheuse de Mercure. Pourquoi cette absence en surface, alors qu'on en trouve à la surface de la Lune et de Mars ? Mercure serait-elle la seule planète du Système solaire où le fer serait en totalité concentré à l'intérieur,



3. AUX ANTIPODES DE CALORIS, le relief est chaotique ; les collines et les fractures résultent de l'impact qui s'est produit sur l'autre face de la planète. Le cratère Pétrarque (au centre) résulte d'un impact beaucoup plus récent, comme en témoignent les rares petits cratères qui parsèment le centre lisse. Toutefois, cette collision fut assez violente pour faire fondre la roche, qui s'est écoulée sur près de 100 kilomètres et s'est déversée dans un cratère voisin.

la croûte ne contenant que des silicates légers ? Certains planétologues supposent que Mercure est resté à l'état fondu si longtemps que les substances denses se sont regroupées au centre (tout comme le fer liquide s'accumule sous le laitier dans un haut fourneau).

La sonde *Mariner 10* a révélé que Mercure a un champ magnétique intense, le plus puissant des planètes telluriques après la Terre. Le champ magnétique terrestre est engendré par les métaux conducteurs en fusion, qui circulent dans le noyau, produisant un effet dynamo auto-entretenu. Si le champ magnétique de Mercure a la même origine, la planète a un noyau partiellement liquide.

Cette hypothèse soulève une difficulté : de petits objets tels que Mercure, ont une grande surface par rapport à leur volume, de sorte qu'ils dissipent plus vite leur énergie vers l'espace. Si Mercure avait un noyau en fer pur, comme sa densité et son champ magné-

tique l'indiquent, son noyau devrait être froid et solidifié depuis longtemps. Toutefois, un noyau solide ne peut produire un effet dynamo auto-entretenu.

Une histoire fracturée

On en déduit que le noyau contient d'autres matériaux qui abaissent le point de solidification du fer, de sorte que cet élément reste liquide même à une température relativement basse. C'est la base de théories récentes que les planétologues cherchent à tester : le noyau de Mercure contiendrait du fer solide entouré d'un mélange de fer et de soufre liquide, à une température de 1 000 °C.

Quand une surface planétaire est suffisamment solidifiée, elle se déforme quand une contrainte lui est appliquée pendant longtemps, ou elle casse comme du verre en cas de choc. Après sa formation, il y a quelque quatre milliards d'années, Mercure a été bom-

bardée par d'énormes météorites qui ont brisé sa fragile enveloppe externe, libérant des torrents de lave. D'autres collisions moins violentes et plus récentes ont aussi libéré des coulées de lave. Ces chocs ont peut-être libéré suffisamment d'énergie pour faire fondre la surface ou pour atteindre les couches profondes liquides, provoquant un épanchement en surface des fluides sous-jacents. La surface de Mercure témoigne d'événements postérieurs à la solidification de la couche externe de la planète.

Les géologues planétaires ont tenté de décrire l'histoire de Mercure d'après ces indices, mais sans connaître précisément la composition des roches de la surface. La seule méthode qui per-

mettrait de connaître l'âge absolu de la planète serait la datation d'échantillons rapportés sur Terre... mais on n'en a aucun. Aussi doit-on estimer des âges relatifs, fondés sur le principe des superpositions : les accidents de terrain les plus récents recouvrent les plus anciens. Ce principe sert notamment à la datation relative des cratères.

À la surface de Mercure, plusieurs grands cratères sont entourés d'anneaux concentriques de collines et de vallées. Ces bassins représentent vraisemblablement des impacts de météorites qui ont engendré des ondes de choc (comme une pierre jetée dans une mare), lesquelles se sont solidifiées sur place. Caloris, avec ses 1 300 kilomètres de diamètre, est le plus grand de ces

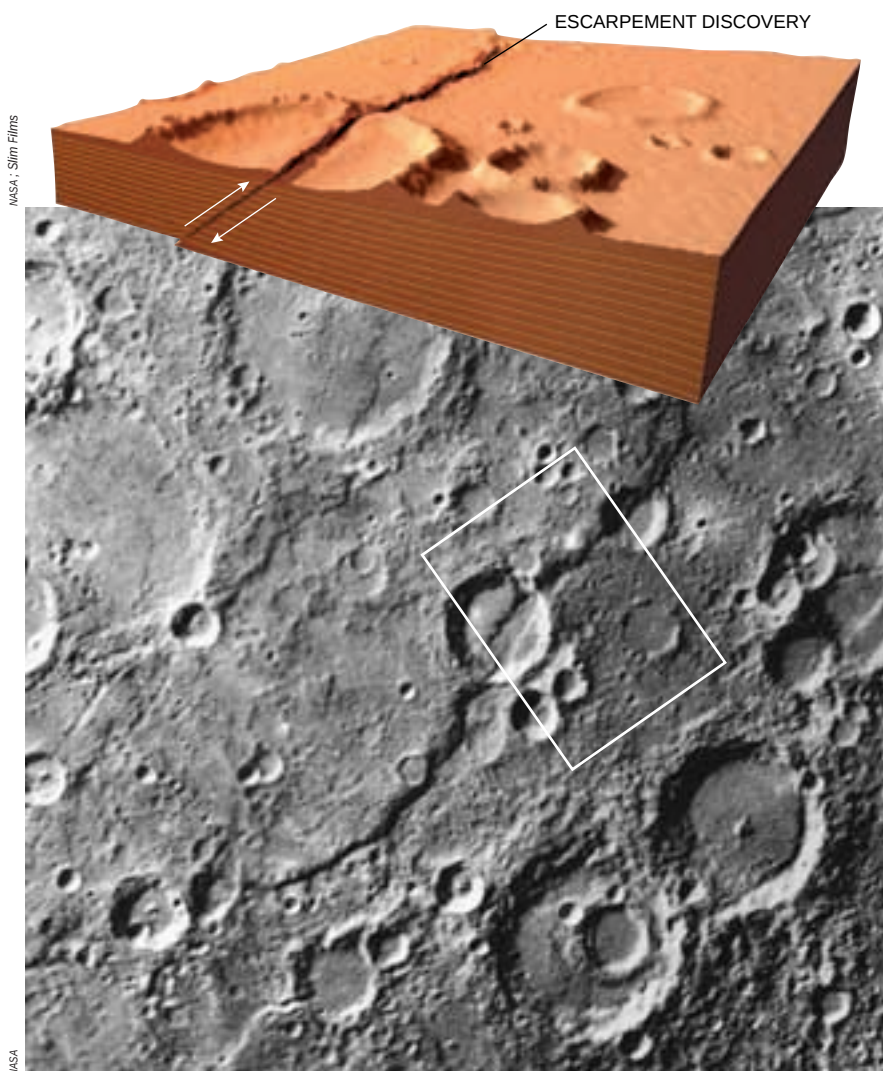
bassins. L'impact qui l'a créé a formé un bassin que les laves ont rempli, créant une surface plane où d'autres cratères plus petits se sont ultérieurement formés. Caloris s'est vraisemblablement formé il y a 3,6 milliards d'années. La collision a été si violente que la surface de Mercure, aux antipodes de Caloris, a été bouleversée : elle est sillonnée de failles.

La surface de Mercure est aussi traversée de reliefs linéaires, surtout orientés Nord/Sud, Nord-Est/Sud-Ouest et Nord-Ouest/Sud-Est. Comment ces reliefs connus sous le nom de grille tectonique de Mercure sont-ils apparus ? Certains astronomes ont supposé que la croûte s'est solidifiée quand la planète tournait beaucoup plus vite sur elle-même (une journée équivalait peut-être à 20 heures). En raison de la vitesse de la rotation, la planète avait initialement un renflement à l'équateur, mais elle aurait pris une forme plus sphérique en ralentissant. Les reliefs linéaires seraient apparus au moment de ce changement de forme (avant le cratère Caloris, car ils ont été effacés par la météorite) : ils seraient dus à cette déformation et aussi à la contraction résultant de la solidification de la planète quand elle a ralenti. Le rétrécissement de la surface de la planète, d'environ un million de kilomètres carrés, aurait formé les failles et les escarpements incurvés qui s'entrecroisent sur la surface de Mercure.

Une atmosphère ténue

Sur la Terre, l'érosion a lissé les reliefs, tandis que les cratères sont restés presque intacts à la surface de Mercure, de Mars et de la Lune. Sur ces trois corps, les proportions des divers cratères en fonction de leur taille sont analogues, mais les cratères de Mercure sont un peu plus gros : les objets qui ont heurté cette planète étaient sans doute plus rapides, en raison de leur orbite elliptique proche du Soleil. Ainsi, ces météorites provenaient sans doute toutes de la ceinture d'astéroïdes. Au contraire, la répartition des cratères des satellites de Jupiter en fonction de leur taille est différente : ces satellites ont été heurtés par des objets qui ne provenaient pas de la ceinture d'astéroïdes.

Le champ magnétique de Mercure est suffisamment intense pour piéger des particules chargées, tels les protons éjectés du Soleil et qui forment le vent solaire. Le champ magnétique



4. L'ESCARPEMENT DISCOVERY (vu en coupe sur le schéma et de dessus sur la photographie) s'étend sur 500 kilomètres ; par endroits, son altitude atteint 2 000 mètres. C'est l'une des nombreuses failles de compression qui sillonnent la surface de Mercure. Ces failles ont vraisemblablement été créées quand certaines parties du noyau de Mercure se sont solidifiées : la surface de la planète diminuant à mesure que la croûte se solidifiait, cette dernière a été comprimée. Par endroits, la croûte comprimée s'est rompue, et un fragment a glissé au-dessus du fragment adjacent, faisant apparaître une faille de compression.

forme un écran, comme la magnétosphère qui entoure la Terre, mais plus petit. Les magnétosphères évoluent sans cesse au gré de l'activité du Soleil : en raison de sa petite taille, le bouclier magnétique de Mercure peut changer beaucoup plus vite que celui de la Terre ; il réagit rapidement aux modifications du vent solaire, dix fois plus dense près de Mercure que près de la Terre.

Un violent vent solaire bombarde sans cesse la face éclairée de Mercure. Le champ magnétique est tout juste suffisant pour éviter que le vent n'atteigne la surface de la planète, sauf quand le Soleil est particulièrement actif ou quand Mercure est au périhélie. Alors, le vent solaire balaie la surface, et ses protons arrachent des atomes à la croûte, qui sont piégés par la magnétosphère.

Toutefois, des objets aussi chauds et aussi petits que Mercure n'ont presque pas d'atmosphère, car les molécules de gaz ont des vitesses supérieures à celle qui leur permet d'échapper à l'attraction de la planète. Sur Mercure, tout matériau volatil finit par se perdre dans l'espace, au point qu'on a même longtemps pensé que Mercure était totalement dépourvue d'atmosphère. C'était une erreur : les spectromètres ultraviolets de *Mariner 10* ont détecté de petites quantités d'hydrogène, d'hélium et d'oxygène, tandis que d'autres observations, faites de la Terre, ont révélé des traces de sodium et de potassium.

L'origine de ces constituants et leur destinée restent sujets à controverse. Contrairement à l'atmosphère terrestre, celle de Mercure s'évapore et se reconstitue sans cesse. Elle semble surtout résulter de l'action, directe ou indirecte, du vent solaire, bien que quelques constituants proviennent peut-être de la magnétosphère ou de comètes. Quand un atome est éjecté de la surface par le vent solaire, il s'ajoute à la mince atmosphère. La planète elle-même libère peut-être encore ses dernières substances volatiles primordiales emprisonnées dans la croûte.

Récemment, une équipe d'astronomes de Pasadena a observé la polarisation circulaire d'un faisceau radar réfléchi près des pôles de Mercure : les résultats ont révélé la présence de glace. Comment des calottes glaciaires ou toute autre forme d'eau peuvent-elles exister sur une planète aussi chaude que Mercure ? Peut-être la

glace – vestige de l'eau primordiale qui s'est condensée au moment de la formation de la planète – est-elle toujours dans des zones d'ombre situées près des pôles ?

Si tel est le cas, on doit conclure que l'orientation de Mercure n'a pas changé depuis la formation du Système solaire, n'exposant jamais un de ses pôles au Soleil, malgré des événements aussi dévastateurs que la formation du cratère Caloris. Une telle stabilité serait étonnante. Une autre possibilité serait que des comètes, tombant sans cesse sur Mercure, y apportent de l'eau. La glace aux pôles resterait dans l'ombre, s'évaporant lentement, et elle serait à l'origine de l'hydrogène et de l'oxygène présents dans l'atmosphère de Mercure. Enfin, d'autres astronomes pensent que les régions polaires à l'ombre contiendraient d'autres substances volatiles, tel le soufre, qui réémettraient les faisceaux radar comme de la glace, mais auraient un point de fusion bien supérieur à 0 °C.

Les obstacles à l'exploration

Pourquoi Mercure a-t-elle été oubliée depuis près de 25 ans d'exploration du Système solaire ? Peut-être parce que Mercure ressemble à la Lune, mais peut-être aussi parce que la NASA a nommé dans ses conseils de direction des personnes qui ont déjà participé à des missions : les experts de certains corps célestes tendent à privilégier l'exploration de ceux-ci. Mercure, peu explorée, a peu d'avocats.

Le coût des études est également une raison importante. Les dirigeants de la NASA demandent aux scientifiques de proposer des missions toujours plus rapides, plus spectaculaires et moins chères. Les objectifs doivent être précis et limités, et l'enjeu scientifique doit justifier le coût. Dans un contexte de limitations budgétaires, les seules missions lointaines sont celles du programme *Discovery*. Les scientifiques doivent s'associer avec des industriels avant de proposer des missions ; certaines sont ensuite sélectionnées et subventionnées par la NASA (jusqu'à présent, quatre de ces missions ont été décidées). D'après les objectifs du programme *Discovery*, une mission ne doit pas coûter plus de 1,3 milliard de francs. À titre de comparaison, la mission *Galileo* vers Jupi-

L'UNIVERS DES SCIENCES

L'UNIVERS DES SCIENCES

LES ÉTOILES

Vie et mort des soleils lointains

JAMES KALER



POUR LA
SCIENCE
400 pages

LES ÉTOILES

Ce livre expose l'origine et la nature de nos connaissances sur les étoiles, avant de les décrire dans leur dynamique et leur devenir. Les objets célestes les plus insolites, géantes rouges, supernovae, pulsars et trous noirs, s'insèrent alors naturellement dans le récit de l'évolution stellaire.

272 pages - 220 F
code 1892

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p.98

ter et la mission *Cassini* vers Saturne coûteront, à elles deux, plus de six milliards de francs.

De surcroît, une mission vers Mercure pose une difficulté technique particulière : la sonde devrait être protégée contre l'intense rayonnement solaire, auquel s'ajoute l'énergie solaire réfléchie par la planète (ce rayonnement pourrait même être encore plus dommageable que le rayonnement direct du Soleil). Malgré toutes ces difficultés, un projet de mission vers Mercure a été soumis en 1994 et deux en 1996.

Le projet de 1994, *Hermès 94*, aurait utilisé un dispositif de propulsion à l'hydrazine nécessitant plus d'une tonne de carburant. La plus grande partie du combustible aurait permis au vaisseau spatial de réduire la taille de l'orbite. Nous n'aurions pu éliminer la charge de carburant qu'en multipliant les rencontres avec d'autres planètes, ce qui aurait ralenti le vaisseau. Ces détours auraient allongé le trajet, qui doit être le plus court possible, car les rayons cosmiques endommagent les instruments embarqués, dont la durée de vie est ainsi limitée. Nous nous proposons de photographier toute la surface de Mercure avec une résolution inférieure à un kilomètre. Nous voulions ensuite relier ces cartes topographiques avec des cartes du champ gravitationnel et du champ magnétique. Finalement, la NASA rejeta le projet en raison de son coût élevé et des risques d'échec.

En 1996, une autre équipe proposa un nouveau projet moins coûteux et plus bref. La quantité de carburant n'aurait pas excédé 300 kilogrammes, car le vaisseau aurait été équipé d'un moteur à propulsion ionique. Ce moteur d'un type nouveau aurait utilisé l'énergie solaire pour ioniser des atomes de xénon et pour accélérer les ions à l'aide d'un champ électrique. La mission *Hermès 96* aurait atteint Mercure une année avant *Hermès 94*. Pourtant, la NASA n'a pas retenu le projet, car elle a jugé que le moteur solaire était encore trop expérimental.

La NASA s'est aussi intéressée à un troisième projet, *Messenger*, soumis dans le cadre des missions *Discovery*. Le vaisseau, conçu par des ingénieurs du Laboratoire de physique appliquée du Maryland, aurait été équipé d'un moteur à propulsion classique. Deux instruments auraient déterminé les proportions des éléments les plus abon-

dants de la croûte rocheuse. Toutefois, la charge supplémentaire due à ces deux instruments aurait imposé d'allonger le trajet : le vaisseau spatial aurait dû passer deux fois à proximité de Vénus et trois fois à proximité de Mercure, avant de se mettre en orbite. Le trajet Terre-Mercure aurait duré plus de quatre ans, le double de ce qui était prévu pour *Hermès 96*. *Messenger* aurait aussi été la mission *Discovery* la plus onéreuse des derniers projets qui ont été évalués (elle a été estimée à 1,2 milliard de francs). C'est vraisemblablement en raison de son coût que le projet n'a pas été sélectionné.

Les personnes qui décident des missions *Discovery* prennent des avis de spécialistes qui ne travaillent pas tous à la NASA, et qui privilégient souvent les techniques éprouvées au détriment des innovations. Pour pallier cette insuffisance, la NASA a décidé de créer un nouveau programme qui s'intéresse exclusivement aux projets futuristes. Ainsi une des missions doit évaluer dans l'espace diverses techniques innovantes qui ont été proposées. En juillet 1998, le vaisseau *Deep Space One*, propulsé par un moteur ionique, entamera un voyage de trois ans en direction de l'astéroïde McAuliffe (du nom de l'astronaute Christa McAuliffe, morte dans l'explosion de *Challenger*), de la planète Mars et de la comète West-Kohoutek-Ikamura. *Deep Space One* devra prouver l'efficacité de la propulsion ionique. Une mission à propulsion ionique vers Mercure est étudiée par l'Agence spatiale européenne pour 2008-2010. Ces missions devraient percer les mystères de la lointaine planète.

Robert NELSON travaille au Laboratoire *Jet Propulsion*, à Pasadena. Il a été l'astronome principal des projets *Hermès 94* et *Hermès 96*, et participe à la mission *Deep Space One* qui sera lancée en 1998.

Atlas of Mercury, sous la direction de M.E. Davies, D.E. Gault, S.E. Dwornik et R.G. Strom, NASA Scientific and Technical Information Office, Washington, D.C., 1978.

Mercury, sous la direction de F. Vilas, C.R. Chapman et M.S. Matthews, University of Arizona Press, 1988.

The New Solar System, sous la direction de J.K. Beatty et A. Chaikin, Cambridge University Press et Sky Publishing Corporation, 1990.
