

Juin 1983 - N° 25

(Deuxième édition, mai 1986)

Éditorial

La gravitation universelle... Concept insolite dont l'histoire est en elle-même passionnante puisqu'y sont associés certains des grands noms qui ont marqué la science occidentale.

Théorie féconde, surtout, qui permet de rendre compte, entre autres, de la chute des corps sur Terre ainsi que du mouvement des planètes, des satellites artificiels et des sondes spatiales...

Mais, grâce à Einstein, la gravitation c'est aussi la clef pour comprendre l'état d'impesanteur, phénomène mal connu, aux conséquences étonnantes tant sur le plan pratique (pour les cosmonautes) que scientifique : ce sera d'ailleurs le thème de notre prochain numéro.

Dans ce numéro

Les dossiers

- De la pesanteur à la gravitation 1

Actualité astronautique

- Sarsat/Cospas, IRAS, etc. 28

Calendrier de l'espace

- Du 6 juillet au 30 octobre 1982 34

Qu'advierait-il d'un boulet qu'un canon projeterait à la verticale? Retomberait-il sur la Terre?

Telle est la question à laquelle le Père Mersenne, au XVII^e siècle, voulut apporter une réponse en réalisant l'expérience représentée sur cette gravure dans l'espoir d'obtenir un indice permettant de trancher le débat entre les partisans d'une Terre immobile et ceux d'une Terre en mouvement...

Aucun des boulets tirés n'ayant été retrouvé, les expérimentateurs en conclurent, naïvement, qu'ils avaient dû se perdre dans l'éther. La querelle des anciens et des modernes rebondissait (Document CNAM/Lauros-Giraudon).

Les dossiers

De la pesanteur à la gravitation

La chute vers le sol de la plupart des objets abandonnés à eux-mêmes au voisinage de la Terre est un fait d'expérience. C'est d'ailleurs un phénomène qui se manifeste depuis toujours, et quotidiennement, aux hommes. Au cours des siècles, de multiples hypothèses ont été avancées pour tenter de rendre compte, d'une façon satisfaisante, des phénomènes observables. Elles ont conduit leurs auteurs à nous proposer une nouvelle conception de l'univers... (*).

Le « bon sens » des Anciens

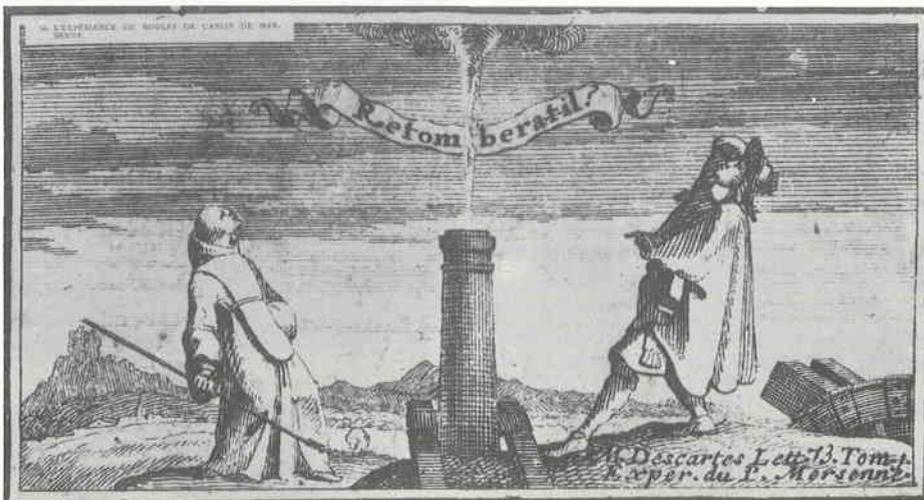
Quelques siècles avant l'ère chrétienne, la civilisation grecque a vu naître bon nombre des savants et philosophes qui ont bâti les fondements de la science antique. Mais cette époque est dominée par la pensée d'Aristote (environ 384-322 avant J.-C.), disciple de Platon et précepteur d'Alexandre le Grand, pensée qui a connu un rayonnement considérable dans tout l'Occident pendant près de... deux mille ans!

(*) Voir note en page 2.

Comme elles se sont imposées, nous examinerons donc les conceptions aristotéliennes sur le sujet qui nous intéresse ici, la chute des corps.

Pour les Anciens, si certains objets sont lourds et d'autres légers, c'est qu'ils renferment, en proportions variables, les « quatre éléments » (terre, eau, air, feu): la terre est « naturellement » lourde, le feu « naturellement » léger, l'air et l'eau occupant des positions intermédiaires.

Le mouvement naturel d'un objet terrestre? C'est le mouvement vertical, selon la ligne droite allant de l'observateur au centre de la Terre. Il est dirigé vers le haut si l'objet est léger, vers le bas s'il est lourd.



De la pesanteur à la gravitation

Pour Aristote, le mouvement de chute est d'autant plus rapide que l'objet est plus lourd (un bloc de pierre devant, selon lui, tomber plus vite qu'une pièce de monnaie). L'influence de la forme de l'objet sur cette vitesse et l'existence de la résistance de l'air sont reconnues.

Selon les Anciens, un corps qui tombe va de plus en plus vite. La raison ? Parce qu'il doit gagner le plus vite possible son lieu naturel.

Pourquoi les corps lourds tombent-ils ? Parce qu'ils sont poussés par le « désir » de rejoindre leur lieu naturel, de s'unir spontanément à la chose semblable. Cette tendance naturelle des corps pesants à la chute (ce qu'on appellera plus tard la pesanteur) est alors considérée comme une propriété de la matière.

Comment les Anciens interprètent-ils les autres trajectoires, celles qui ne sont pas verticales (par exemple, celle d'un projectile ou d'une pierre lancée en l'air,...) ? Pour eux, elles résultent d'un mouvement « violent » contraire à la nature de l'objet. Mais, tôt ou tard, l'objet retrouvera son mouvement naturel cherchant à reprendre sa place naturelle...

Dans le ciel défilent les corps célestes (étoiles fixes et étoiles errantes — les planètes —, le Soleil et la Lune) constitués — affirment les Anciens — d'un cinquième élément, l'éther. C'est une substance immuable, « incorruptible » disent-ils, contrairement aux quatre éléments terrestres susceptibles de subir des changements.

Sur Terre, les choses naissent, se transforment et meurent. Dans les cieux, par contre, rien ne change : tout est parfait et éternel.

Le mouvement naturel d'un corps céleste ? C'est le mouvement circulaire uniforme qui évoque la perfection et la perpétuité. Un peu plus tard, au II^e siècle de notre ère, dans son système du monde, l'astronome Ptolémée essaiera de rendre compte du mouvement réel des corps célestes en faisant intervenir des combinaisons de mouvements circulaires.

(*) Pour le lecteur qui souhaiterait en savoir plus sur le sujet, nous avons indiqué en page 24 quelques articles et quelques ouvrages : de quatre d'entre eux, repérés par un numéro de référence, sont extraites les citations reproduites. D'autres références, concernant des points plus précis, d'intérêt moins général, sont citées en cours d'article. Naturellement le lecteur tirera tout profit à consulter également divers manuels scolaires et universitaires et les encyclopédies de son choix.

(1) En réalité, dans le système de Ptolémée le centre des déferents ne coïncide pas avec celui de la Terre.

Située au centre du monde (1) et entourée de ces corps incorruptibles, la Terre — de nature différente — est elle-même immobile (aucun déplacement dans l'espace, aucune rotation sur elle-même). Elle est unique dans l'univers, c'est le berceau de l'humanité.

Aux yeux des Anciens, la distinction est donc très nette entre, d'une part, le

monde sublunaire, la Terre et ses environs immédiats, d'autre part, le monde sidéral : deux mondes différents ayant des lois physiques différentes.

Voilà, sommairement présentées, quelques-unes des évidences reconnues par les Anciens et qui allaient être considérées comme vraies et enseignées dans toutes les universités occidentales au moins jusqu'au XVII^e siècle.

Galilée, ses expériences et ses observations

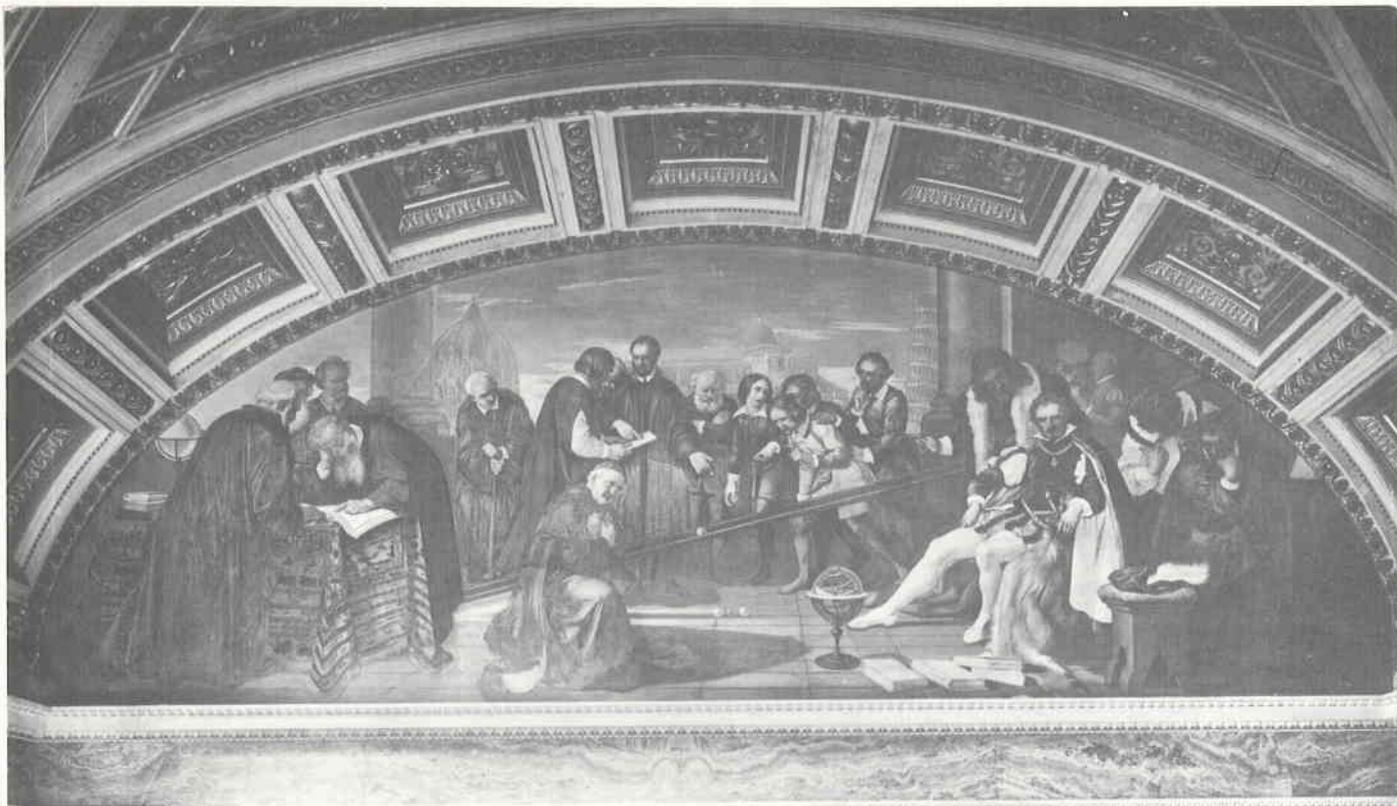
Né à Pise en 1564, Galilée consacra sa vie aux mathématiques, à la physique et à l'astronomie partageant son

temps entre l'enseignement, la recherche, des travaux d'ingénieur et la rédaction de plusieurs traités.



A en croire cette gravure d'inspiration romantique, c'est à un véritable emprisonnement qu'aurait été condamné Galilée, le 16 juin 1633, au terme de son procès. En réalité, il fut renvoyé dans sa maison d'Arcetri, près de Florence, où il resta assigné à résidence jusqu'à sa mort.

A noter, sur le pilier, la représentation schématique du système héliocentrique qu'on lui reprochait de propager (Document B.N., Galilée d'après J. Laurent et Deveria, 1825).



A Pise, en présence de Jean de Médicis, Galilée renouvelle ses expériences sur la chute des corps au moyen de boules et d'un plan incliné. Galilée est au centre, parmi ses élèves et disciples (Peinture murale du musée de physique et d'histoire naturelle de Florence, exécutée par G. Bezzuoli, au XIX^e siècle; document Alinari).

Son œuvre est considérable et son cheminement intellectuel passionnant; quant à son existence, elle connut une fin dramatique et humiliante suffisamment célèbre (2) pour qu'on s'abstienne d'y revenir (le procès de 1633 le condamne à la résidence surveillée jusqu'à la fin de ses jours; il s'éteint en 1642).

Dans le cadre de cet article sur la chute des corps, nous verrons d'abord en lui le **fondateur de la dynamique moderne** (science du mouvement des corps considéré dans ses rapports avec les forces qui en sont les causes).

Rebuté par la médiocrité de l'enseignement de son époque, il se singularise en accordant une large place, dans ses recherches et réflexions, aux faits et au monde de l'expérience: il évalue des temps, détermine des poids, mesure des distances, etc. Pour lui, connaître implique démontrer, confronter et prouver. Il souhaite vérifier ce qui est enseigné. Et, de ce fait, on le tient pour l'un des créateurs, avec l'Anglais F. Bacon (1561-1626), de la méthode expérimentale (3).

★ Ses recherches sur le mouvement pendulaire (étude des lois régissant les oscillations du pendule), puis ses expériences de Pise (mise en chute libre de

divers objets de masse et de forme différentes depuis le sommet d'une tour [4]), et, plus tard, l'utilisation de plans inclinés pour ralentir la chute des billes l'amènent (5) à énoncer *les lois de la chute des corps* (6), résultats qui vont à l'encontre des principes et des postulats des Anciens. Valables dans un repère lié à l'écorce terrestre, ces lois peuvent être exprimées de la façon suivante :

● **tous les corps tombent avec la même accélération quel que soit leur poids.** Selon Galilée, les écarts constatés au cours des expériences sont imputables à la seule résistance de l'air. Faisant preuve d'une forte perspicacité, il estime que dans le vide (dont l'existence restera hypothétique jusqu'au milieu du XVII^e siècle) cette loi devrait être rigou-

reusement vérifiée. Une trentaine d'années plus tard, réalisant des expériences sous vide, R. Boyle prouva qu'il en est vraiment ainsi. (Et en 1971, à la surface de la Lune, corps céleste dépourvu d'atmosphère, l'astronaute Scott se livra à une expérience du même type: il laissera tomber un marteau et une plume d'oiseau qui gagneront le sol à la même vitesse.)

● **les espaces parcourus par un corps en chute libre sont proportionnels au carré des temps correspondants.** C'est la *loi des espaces* qu'on exprime aujourd'hui par la relation: $e = 1/2 gt^2$ dans laquelle e est la distance parcourue, g l'accélération de la pesanteur et t la durée de chute. (On suppose que pour $t = 0$, on a $v_0 = 0$ et $e_0 = 0$.) On dit d'un tel mouvement qu'il est uniformément accéléré.

● **la vitesse d'un corps en chute libre s'accroît proportionnellement au temps.** C'est la *loi des vitesses* qu'on exprime aujourd'hui par la relation: $v = gt$ où v est la vitesse du corps, g l'accélération de la pesanteur et t la durée. (On fait les mêmes hypothèses que précédemment.)

Pour une chute se produisant dans l'air, Galilée signale la possibilité d'atteindre une vitesse limite, lorsque la résistance de l'air devient égale au poids et que le mouvement se poursuit de façon uniforme.

(2) Voir *L'Affaire Galilée*, Pour la science, octobre 1982, pp. 68-79. Ajoutons qu'en 1979 le pape Jean-Paul II a souhaité que soit rouvert le dossier Galilée.

(3) Cette thèse est toutefois contestée par certains historiens des sciences. A ce sujet, lire *Galilée et l'expérimentation*, La recherche, avril 1983, pp. 442-454.

(4) Contrairement à ce que rapporte la légende, nul ne peut assurer qu'il s'agissait de la célèbre tour penchée.

(5) Reconnaissons toutefois que dans ses spéculations Galilée a utilisé certains travaux et certaines idées de ses prédécesseurs médiévaux ou plus anciens (Réf. 2, p. 108).

(6) Leur formulation exacte ne daterait que de 1632 et non de 1602 comme il est souvent mentionné (Réf. 1, p. 191).

De la pesanteur à la gravitation

Et s'il ne découvre pas la cause de la pesanteur, il n'en met pas moins en évidence l'« usage » particulièrement simple de la nature dans le mouvement vertical des corps lancés vers le bas ou vers le haut : une **accélération constante**.

Quant à la fameuse **loi de l'inertie** (7), les historiens ne s'accordent guère : pour les uns, Galilée en serait l'inventeur, pour les autres, il n'aurait fait que l'approcher sans l'énoncer véritablement (à Newton revenant l'honneur de la formuler dans sa conception la plus large, en laissant place à un univers infini que semblait refuser Galilée). Avec, semble-t-il, juste raison, certains auteurs (cf. Réf. 2) précisent que Galilée n'aurait fait appel à un principe d'inertie que dans le cas particulier du mouvement circulaire (corps en rotation) et celui d'un mouvement rectiligne limité (corps pesants) sans qu'une généralisation permette d'englober tous les cas.

★ Pour la connaissance de la **trajectoire des projectiles**, l'apport de Galilée est tout aussi important. Il réussit à démontrer que la trajectoire d'un projectile est une parabole (8) (du moins en serait-il rigoureusement ainsi sans la résistance de l'air et en supposant galiléen le repère terrestre et uniforme le champ de pesanteur terrestre). Celle-ci résulte de la combinaison de deux mouvements indépendants, c'est-à-dire sans incidence l'un sur l'autre, se faisant à angle droit : un mouvement uniforme (à vitesse constante) vers l'avant, selon l'horizontale et un mouvement uniformément accéléré (à vitesse croissante et accélération constante) vers le bas, selon la verticale.

Pourquoi Galilée entreprit-il ces recherches sur la chute des corps ? En copernicien (9) convaincu, il voulait résoudre le problème de la chute des corps dans l'hypothèse d'une Terre en mouvement autour du Soleil.

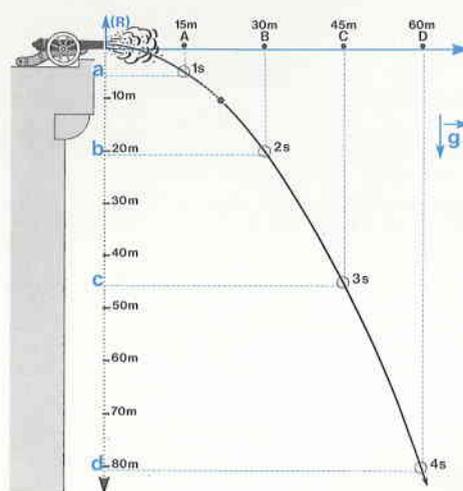
(7) Par **inertie**, on désigne la résistance naturelle des corps à toute modification de leur état de repos ou de mouvement. Si un corps est au repos, il tend à le rester; s'il est en mouvement, il tend à le rester.

(8) Les propriétés des **sections coniques** (obtenues par l'intersection de plans coupant sous diverses inclinaisons un cône droit, à savoir ellipse, parabole et hyperbole) ont été décrites par le mathématicien grec Apollonios de Perga (vers 262-280 av. J.-C.). Avec Galilée, c'est la première fois que l'une d'entre elles intervient à propos de l'étude d'un phénomène naturel. Après lui, Kepler et Newton iront dans la même voie.

(9) Disciples de l'astronome polonais N. Copernic (1473-1543), les **coperniciens** étaient partisans du système héliocentrique : le Soleil est au centre de l'univers tandis que les planètes sont animées d'un double mouvement; elles tournent, d'une part, sur elles-mêmes, d'autre part, autour du Soleil.

Comment Galilée analyse-t-il la trajectoire des projectiles ?

Pour le comprendre, considérons l'exemple d'un boulet de canon tiré horizontalement, avec



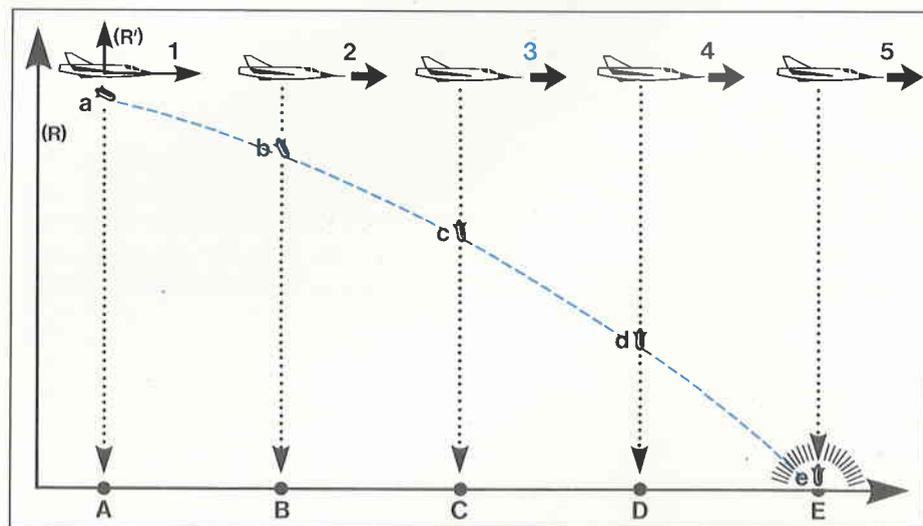
une vitesse de 15 m/s, depuis un rempart. (Le mouvement est rapporté à un repère terrestre R supposé galiléen et la résistance de l'air est négligée.)

Si l'attraction terrestre n'existait pas, le boulet aurait un mouvement horizontal, rectiligne et uniforme : en une seconde il serait en A, en deux secondes en B, etc.

Si le boulet quittait le canon sans vitesse initiale, soumis à l'attraction terrestre il serait en chute libre. Son mouvement serait vertical, rectiligne et uniformément accéléré : en une seconde il serait en a, en deux secondes en b, etc.

Galilée démontre que la trajectoire théorique du boulet est une **parabole** qui résulte de la combinaison des deux mouvements précédemment évoqués.

Autrement dit, dans la première seconde qui suit son éjection le boulet progresse horizontalement de 15 m et, simultanément, descend de 15 m. Pendant la seconde suivante, il progresse horizontalement de 15 m et descend de 15 m, etc. (Document E1 — Boltana/Reilles).



Cet autre exemple va nous servir à souligner l'importance du repère utilisé pour l'analyse de la trajectoire d'un projectile.

Soit un avion dont on suppose la masse et la vitesse constantes. (On néglige la résistance de l'air.) Au-dessus de A, il lâche une bombe et continue son vol.

Le mouvement de ce projectile sera analysé, d'une part dans un repère (R), terrestre et supposé galiléen, d'autre part dans un repère (R'), lié à l'avion et lui aussi galiléen.

Pour un observateur terrestre, fixe par rapport à (R), le projectile va décrire la parabole a — b — c — d — e.

Pour un observateur passager de l'avion, immobile par rapport à (R'), le projectile va demeurer à la verticale de l'avion et décrire une droite.

Parabole dans un cas, droite dans l'autre : aucune des deux trajectoires n'est plus « vraie » que l'autre, c'est simplement une question de repère (Document E1 — Boltana/Reilles).

Si, comme l'affirmaient Copernic... et d'autres, la Terre se déplace autour du Soleil en même temps qu'elle tourne sur elle-même, comment expliquer qu'un corps tombe verticalement vers le sol ? (Exactement comme si la Terre était... « immobile » dans l'espace !) Et comment répliquer aux arguments des partisans des Anciens selon lesquels la Terre ne pouvait qu'être immobile car, dans le cas contraire, les nuages qui flottent dans l'air et les oiseaux qui quittent leur branche — sans liens avec

le sol — devraient systématiquement être distancés et se retrouver loin derrière la Terre...

Et ses travaux sur la combinaison des mouvements lui permettent de trouver une explication : prenant l'exemple d'une pierre lâchée du sommet du mât d'un navire, il affirme qu'elle tombera toujours au pied du mât, que le navire soit immobile ou en mouvement... Partant de là, il est facile de transposer et d'assimiler la Terre à un navire, etc.

Malheureusement pour Galilée, ce n'est pas la preuve (10) du mouvement de la Terre. Ses expériences montrent seulement que les lois de la chute des corps — telles qu'il les a établies — s'accrochent fort bien d'une Terre en mouvement... mais qu'elles ne l'exigent pas !

★ Autre grand domaine où s'illustre Galilée, l'**astronomie**. Partisan du système proposé par Copernic au milieu du XVI^e siècle, il est attaché aux mouvements circulaires des planètes sans

(10) Ses expériences ne lui apporteront d'ailleurs jamais cette preuve tant attendue. La seule preuve qu'il pensait détenir, sa théorie du flux et du reflux de la mer, était erronée. Il faudra attendre 1851 et l'expérience de Foucault, à Paris, pour prouver expérimentalement la rotation de la Terre sur elle-même.

toutefois tenter d'en expliquer les raisons. (Il n'acceptera jamais l'idée des orbites elliptiques de Kepler avec lequel il entretenait une correspondance et qui lui avait adressé des exemplaires de ses livres.) Il pose un principe d'« inertie circulaire » selon lequel « un objet lancé sur un chemin circulaire continue le chemin en cercle, à vitesse constante et pour toujours, sauf s'il subit l'action d'une force extérieure » (Réf. 2, p. 122). Il allait appartenir à Newton de donner une formulation exacte de ce principe et de fonder une véritable mécanique céleste.

Le perfectionnement qu'il apporte, dès 1609, à la *lunette astronomique* le conduit à être l'un des premiers hommes à découvrir les cieux autrement qu'à l'œil nu. Ses observations sont très impor-

tantes (découverte du relief de la Lune, des quatre gros satellites de Jupiter, des phases de Vénus, des taches et de la rotation du Soleil,...) et leurs conséquences — fondamentales — allaient étayer le système copernicien du monde : les corps célestes n'ont pas la perfection imaginée par les Anciens et certains ressemblent même à la Terre (la Lune et ses montagnes, par exemple), le Soleil ne peut se trouver qu'au centre du monde, etc.

« Galilée n'a pas réellement expliqué comment la Terre pouvait se mouvoir, mais il a réussi à montrer pourquoi des expériences faites sur la Terre, telles que celles sur la chute des corps pesants, ne pouvaient ni prouver ni infirmer le mouvement de la Terre. » (Réf. 2, p. 125).

Un chercheur besogneux et obstiné : Kepler

Très tôt initié à l'astronomie sous l'influence d'un maître remarquable (Maestlin), l'Allemand Johannes Kepler (1571-1630) se rallie rapidement aux conceptions de Copernic, probablement dès 1596. En 1600 il est admis à travailler à Prague aux côtés de l'astronome danois Tycho Brahé (1546-1601) dont il va utiliser les très nombreux résultats d'observations (11), faites depuis une vingtaine d'années, pour tenter d'établir la véritable structure de l'univers.

Sur les conseils de Tycho Brahé, Kepler décide de s'appuyer sur les résultats des observations et de les confronter à la théorie, ou plutôt aux théories. Ce qui va le conduire à des conclusions inattendues dont ne peuvent rendre compte ni le système de Ptolémée ni celui de Copernic ni celui de Tycho Brahé.

En effet, la nécessité à laquelle il aboutit est... d'abandonner les trajectoires circulaires (retenues par tous ses prédécesseurs, sans exception) pour les remplacer par des orbites elliptiques...

C'était là une proposition dont nous réalisons difficilement la hardiesse aujourd'hui : pour la première fois, *on osait rompre avec l'hypothèse deux fois millénaire du mouvement circulaire !*

(11) Faites à l'œil nu au moyen d'instruments de grandes dimensions, les observations de Tycho Brahé ont parfois une précision d'environ une minute d'arc, soit dix fois meilleure que celle des données dont disposait Copernic.

Trois lois (12) vont naître des travaux de Kepler :

● **1^{re} loi : l'orbite de chaque planète est une ellipse dont le Soleil occupe un foyer.** Cette loi fut établie en 1605 avec des données relatives à Mars et publiée en 1609;

● **2^e loi : les surfaces balayées pendant des temps égaux par le rayon vecteur Soleil/planète sont égales.** C'est la loi des aires, en fait découverte la première, en 1602, en étudiant l'orbite de la Terre mais également publiée en 1609;

● **3^e loi : pour chaque planète du système solaire, il y a proportionnalité entre le carré de la période (temps nécessaire à la planète pour parcourir une orbite) et le cube du demi-grand axe de l'orbite.** C'est la loi d'harmonie énoncée en 1618 qui semble bien impliquer « que le soleil fournit la force qui gouverne les planètes et les fait se mouvoir comme elles le font ». (Réf. 2, p. 141)

Pour la première fois, les mouvements planétaires satisfont à des lois mathématiques. Si elles ne fusionnent pas encore, la physique céleste et la physique terrestre tendent l'une vers l'autre...

(12) Ces lois sont énoncées en considérant les mouvements rapportés soit au **repère de Copernic** (l'origine est au centre d'inertie du système solaire et les trois axes sont dirigés vers trois étoiles, ces axes formant un dièdre indéformable), soit au **repère de Kepler** (l'origine est au centre d'inertie du Soleil et les trois axes sont parallèles à ceux du repère de Copernic), ces deux repères pouvant être considérés comme galiléens. Pour les lois de Kepler, voir aussi El, n° 8, p. 6.

Le « moteur » de ces mouvements elliptiques ? Pour Kepler, c'est dans le Soleil, centre de notre système planétaire, qu'il doit résider. Un peu à l'image de la chaleur ou de la lumière qui en émane, il envisage une « vertu » magnétique ou pseudo-magnétique (13) qui expliquerait pourquoi les planètes se soumettent à ses lois. Toutefois cette « vertu » ne serait « pas attractive, mais seulement *promouvante*, s'exerçant à la manière d'un bras poussant la planète ». (Réf. 4, p. 8) Selon Kepler, elle ne s'exercerait que dans le plan de l'orbite et son intensité varierait en raison inverse de la distance (loi en $1/r$).

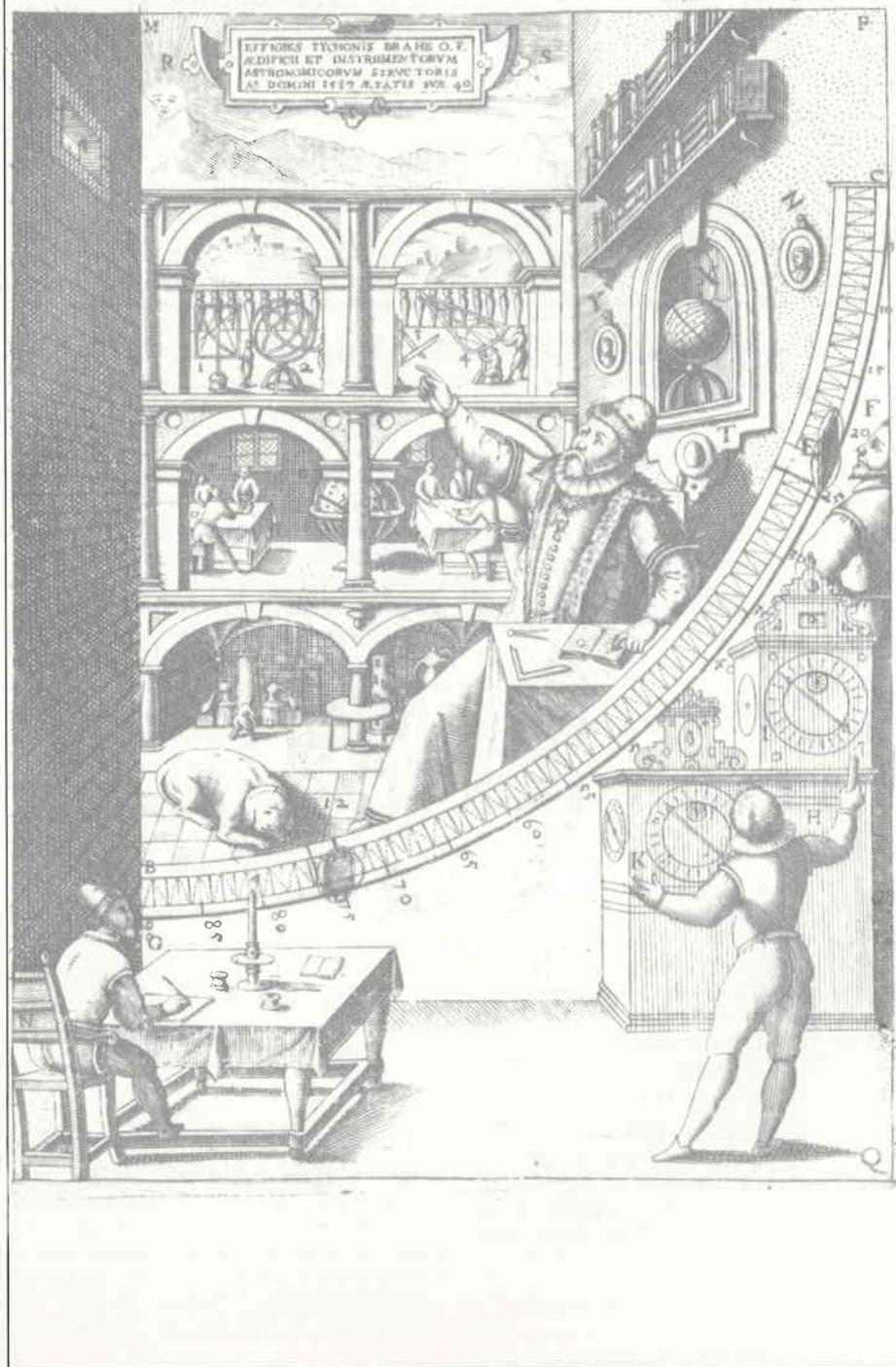
Dans son ouvrage paru en 1609, *Astronomie nouvelle*, Kepler évoque l'attraction mutuelle qu'il ne croit possible qu'« entre corps apparentés, comme la Terre et la Lune, et non entre la Terre et les planètes non plus qu'entre le Soleil et les planètes... ». (Réf. 1., p. 294) Il n'ira pas plus loin en ce domaine.

Il n'est pas difficile d'imaginer que les découvertes de Kepler durent paraître inacceptables à ses contemporains, pour la raison majeure qu'elles portaient atteinte aux mouvements circulaires admis par tous, des aristotéliens aux coperniciens, Galilée inclus. Au surplus, ses écrits étaient confus (14),

(13) A cette époque, les propriétés des aimants étaient connues et c'est en 1600 que W. Gilbert avait publié le premier traité scientifique sur le magnétisme terrestre (cf. El, n° 18, p. 3).

(14) A ce sujet, lire *Kepler aux sources de l'astronomie et de la science-fiction*, La recherche, novembre 1971, pp. 986-988.

QVADRANS MVRALIS SIVE TICHONICUS.



Tycho Brahé au travail, dans son observatoire d'Uraniborg, construit sur l'île de Hven, près de Copenhague. Pendant plus de quinze ans, il va s'y livrer à la construction d'instruments, à l'observation et au calcul astronomiques.

Tombé en disgrâce, il quitte le Danemark et est accueilli à Prague, en 1599, par l'empereur Rodolphe II: c'est là qu'il rencontre Kepler qui saura exploiter les documents de son maître (Document B.N.).

d'une langue prolixe et complexe, fertiles en spéculations mystico-mathématiques d'inspiration pythagoricienne, propres à rebuter les esprits les mieux disposés. Il n'est donc pas étonnant que ses ouvrages aient eu peu d'audience; Newton, par exemple, ne les a probablement jamais lus, mais il connaissait les lois de Kepler, sans doute par l'intermédiaire d'un traité d'astronomie quelconque.

Le génie de Newton

Déjà célèbre pour divers travaux en mathématiques, en astronomie et en optique, Isaac Newton (1642-1727) a joué un rôle déterminant dans la compréhension du phénomène de chute des corps en concevant la **théorie de la gravitation universelle**.

L'originalité de cette théorie (que d'aucuns considèrent comme une des plus grandes productions de l'esprit humain) est d'introduire une idée tout à fait nouvelle, celle d'une attraction mutuelle entre tous les corps matériels de l'univers et d'instaurer des lois physiques valables aussi bien sur Terre que... dans les cieux.

On sait aujourd'hui que ce phénomène d'attraction se manifeste dans tout l'univers: les étoiles s'attirent entre elles, de même les galaxies, les amas de galaxies, etc.

Dans la région de l'univers que nous occupons (ce qu'on appelle le système solaire), là aussi les corps célestes exercent, les uns sur les autres, des forces attractives. Mais c'est le Soleil, le plus massif d'entre eux, qui impose sa loi et contraint les planètes à tourner autour de lui (15).

Et c'est une force de même nature qui maintient les satellites naturels des planètes (ainsi, aujourd'hui, que les satellites artificiels envoyés par l'Homme) sur leurs orbites.

Et la *chute des corps pesants*? C'est encore la manifestation de cette tendance de la matière à s'agglomérer: la Terre attire fortement les objets de son voisinage. Autrement dit, la **pesanteur terrestre** (qui provoque la chute des corps, voir encadré p. 14) n'est qu'un cas particulier de la gravitation universelle. Une pierre lancée en l'air qui retombe sur le sol, la Lune tournant

(15) C'est là la représentation la plus familière du système solaire, les mouvements étant alors rapportés au repère de Kepler. Bien sûr en la matière le choix du repère est fondamental (voir par exemple EI, n° 20, p. 5, note 4).

autour de la Terre, les planètes en mouvement autour du Soleil, les étoiles qui restent groupées en amas : autant de manifestations d'un même phénomène, la gravitation.

Ces idées révolutionnaires, et bien d'autres, sont contenues dans les *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (16), ouvrage de quelque cinq cents pages, écrit en latin et publié à Londres en 1687 avec un tirage initial de 250 ou 300 exemplaires dont le retentissement dans le monde scientifique et philosophique allait être extraordinaire. Leur gestation — qui nous est mal connue — a vraisemblablement été longue et à ce sujet les opinions des historiens divergent.

Pour les uns, l'essentiel aurait été trouvé au cours des « années admirables », entre l'automne 1665 et le printemps 1667 (17), lorsque Newton se

(16) Par *philosophie naturelle* on désigne alors un ensemble de disciplines couvrant notamment la physique, l'astronomie et les mathématiques.

(17) C'est d'ailleurs au cours de cette période que la légende situe généralement l'*anecdote de la pomme*. Se promenant dans la campagne et observant la chute d'une pomme, Newton aurait soudain été plongé dans une profonde méditation sur la cause qui tire chaque objet en chute le long d'une droite semblant passer à proximité du centre de la Terre. Ultérieurement, il se serait demandé si le pouvoir attractif de la Terre, constaté sur la pomme, ne s'étendait pas jusqu'à la Lune... et dans ce cas, pourquoi la Lune était retenue sur sa trajectoire. Était-il possible de trouver une même explication à deux phénomènes a priori aussi différents ?

Il ne s'agit sans doute là que d'une *histoire imaginaire*, peut-être colportée par Newton lui-même à la fin de sa vie (Réf. 3, p. 110) afin de mieux fonder l'antériorité de ses recherches par rapport à celles de ses contemporains. La légende aurait été introduite en France par Voltaire qui assista, en 1727, aux obsèques de Newton et ramena à Paris un exemplaire des *Principes*. Plus tard, il rédigea un traité de vulgarisation pour faire connaître en France l'œuvre du savant anglais.

retira sur ses terres, à Woolsthorpe (Lincolnshire), l'université de Cambridge où il était étudiant étant fermée en raison d'une épidémie de peste à Londres. C'est là qu'il aurait jeté — seul et d'une façon originale et indépendante — les fondements de son œuvre scientifique monumentale.

Le caractère incomplet de son travail sur la gravitation et son peu d'inclination pour la polémique l'auraient retenu de divulguer alors ses découvertes.

Selon les autres (cf. Réf. 1, p. 295 et Réf. 2 et 3), ce ne serait qu'au début de 1685 qu'il aurait été en possession de tous les éléments de sa théorie (ce qui n'exclut pas les premières spéculations vingt ans plus tôt). Tous cependant (sauf peut-être Newton lui-même) s'accordent à reconnaître l'importance de l'influence exercée par son compatriote R. Hooke (1635-1703) avec lequel Newton échangea une correspondance à partir de 1679 (18).

(18) C'est Hooke qui aurait suggéré à Newton un nouveau type d'analyse d'un mouvement le long d'une trajectoire courbe ainsi que la loi d'attraction en $1/r^2$.

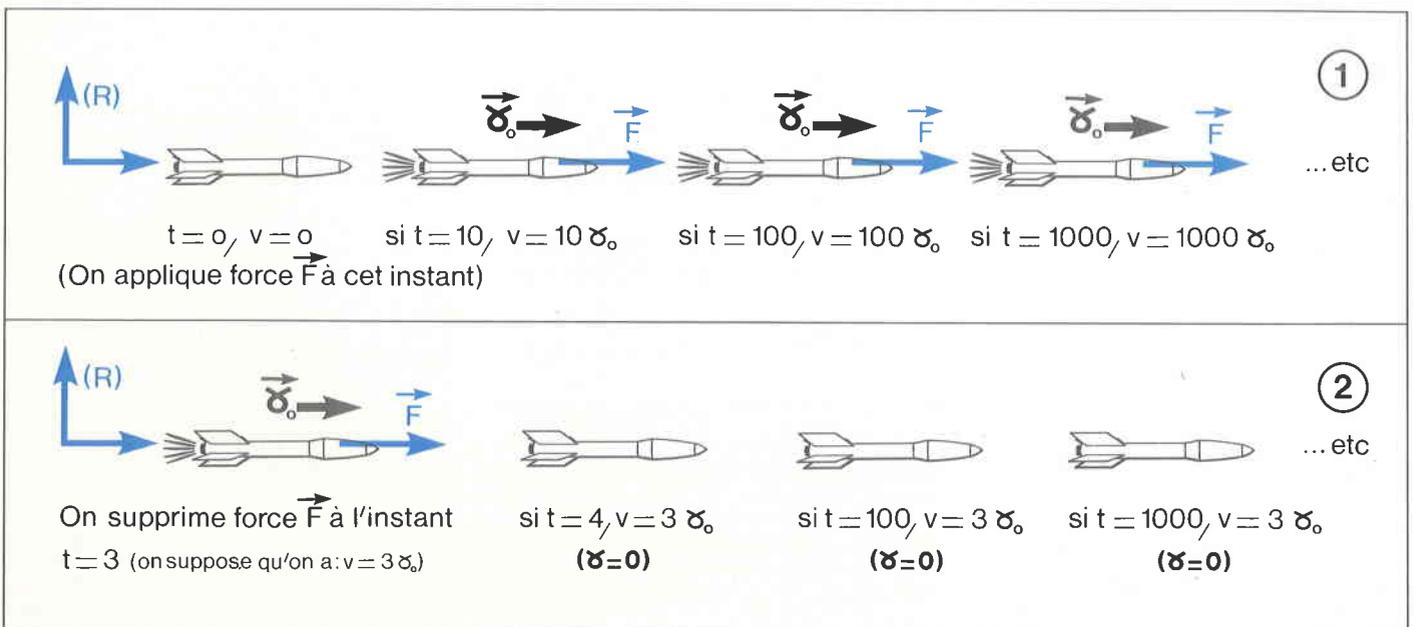
Il aurait aussi tenté, mais bien sûr sans succès, de mettre en évidence une éventuelle variation de la pesanteur avec l'altitude en réalisant des expériences de chute des corps depuis le haut de la tour de Westminster, à Londres.

Néanmoins Newton reconnaîtra sa dette à l'égard de certains de ses prédécesseurs ou contemporains en déclarant : « Si j'ai vu plus loin que les autres, c'est que j'étais monté sur les épaules de géants ». (Réf. 1, pp. 293-294)

Le principe d'inertie selon Newton. Pour illustrer ce principe, considérons une fusée qu'on imaginera en mouvement dans le vide et dont on supposera la masse constante. Son mouvement sera rapporté au repère (R) supposé galiléen.

Cas 1 : A compter du temps $t = 0$, ses moteurs sont allumés. Elle subit l'action d'une force constante \vec{F} . Sa vitesse croît régulièrement.

Cas 2 : La même fusée subit l'action d'une force \vec{F} qui cesse au temps $t = 3$ s (on lui suppose alors une vitesse de $3\gamma_0$). Conformément au principe d'inertie de Newton, la fusée poursuivra indéfiniment sa course, en ligne droite et à vitesse constante, tant qu'aucune autre force n'interviendra (Document E1 — Boltana/Reilles).





Newton a su donner une explication commune à deux grands thèmes de réflexion des milieux intellectuels de la Renaissance, la chute des corps et le mouvement des planètes (Document B.N.).

Un être austère

Lors de la publication des Principes, Newton est âgé de quarante-cinq ans. Son valet en fait alors la description suivante :

« Je ne l'ai jamais vu se reposer, ni se distraire. Jamais il ne partait à cheval prendre l'air, ni ne se promenait, ni ne jouait aux boules, ni ne prenait aucun exercice quel qu'il fût. Car il pensait que les heures qu'il ne consacrait pas à l'étude étaient des heures perdues. Ce qui fait qu'il ne sortait pratiquement jamais de sa chambre en dehors des heures où il se rendait à ses cours (...) auxquels très peu d'étudiants assistaient et que moins encore ne comprenaient, à tel point qu'on pouvait dire souvent qu'il parlait pour les murs... »

(Extrait de Cosmos, Éd. Mazarine, 1981, pp. 68-69.)

objet donné, cette grandeur est une constante qui correspond à la quantité de matière contenue.

Dans la relation de Newton, elle mesure en quelque sorte la tendance de l'objet à résister au changement, à rester dans l'état où il est. On parle alors de *masse d'inertie*.

Un simple examen de la relation 1 apprend qu'une même force appliquée à des masses de plus en plus importantes conduira à des accélérations de plus en plus faibles.

Ces deux lois étaient difficiles à établir dans la mesure où la nature n'en offre que fort peu d'illustrations (la Lune et les planètes) en raison de la présence de forces perturbatrices qui conduisent à des conclusions erronées (exemple classique de l'automobile sur laquelle agit une force de traction constante... et qui se déplace à vitesse constante — et non à accélération constante — du fait des forces de frottement et de la résistance de l'air. Pour les mêmes causes, un palet que l'on fera glisser sur une surface horizontale glacée ne poursuivra pas indéfiniment son mouvement).

3. — La loi de l'égalité de l'action et de la réaction, dans les actions mutuelles de deux corps. Elle a été présentée par ailleurs (cf. EI, n° 17, p. 2) aussi ne nous y attarderons-nous pas. Rappelons seulement qu'elle constitue le fondement théorique de la propulsion en astronautique. Newton conçut lui-même l'idée d'une automobile à réaction propulsée par un puissant jet de vapeur.

Outre ces trois lois, l'ouvrage de Newton contient également une *analyse fort détaillée du mouvement d'un mobile le long d'une trajectoire* (en supposant nulle la résistance du milieu).

2. — La loi des forces. C'est ce qu'on appelle la loi fondamentale de la dynamique. Appliquée en toute rigueur à un point matériel (et dans un repère galiléen), elle s'exprime aujourd'hui par la relation :

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

avec $\vec{p} = m\vec{v}$ (quantité de mouvement)

Ce qui, dans le cas d'une masse constante, conduit à :

$$\vec{F} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \vec{\gamma}$$

Cette loi établit que lorsqu'on applique une force d'intensité F à un corps indéformable de masse m , celui-ci subit

une accélération de valeur γ (20) telle que : $\gamma = F/m$. La présence des flèches sur F et γ indique que la relation est également vectorielle (l'accélération a toujours la direction et le sens de la force).

C'est là une relation importante qui montre que l'intensité de la force appliquée à un corps indéformable quelconque peut être reliée à l'accélération de ce corps — c'est-à-dire à la variation de sa vitesse — et non à la vitesse elle-même *comme on le pensait auparavant*.

Pour Newton, c'est l'occasion de définir une nouvelle notion jusque-là encore inconnue, **la masse**. Pour un

(20) Un usage récent dans l'enseignement secondaire veut qu'une accélération soit plutôt désignée par \vec{a} que par $\vec{\gamma}$ (comme jadis), afin d'éviter toute confusion avec le γ de la relativité :

$\gamma = 1/(1-v^2/c^2)^{1/2}$

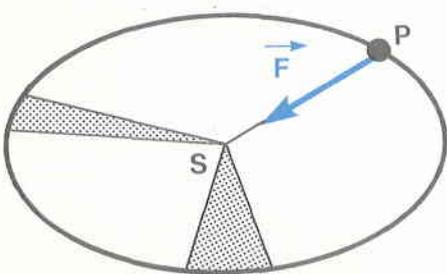
Pour aider à comprendre la démarche de Newton pour parvenir à la loi de la gravitation à partir des trois lois de Kepler, nous rapportons ici l'enchaînement de propositions qui mènent à la loi de Newton, tel qu'on le trouve exposé dans le célèbre *Traité de mécanique céleste*, de F. Tisserand, écrit à la fin du XIX^e siècle.

(1) Si la trajectoire d'un mobile est plane et si le rayon vecteur mené du mobile à un point fixe S du plan de la trajectoire décrit des aires proportionnelles au temps, la force motrice est constamment dirigée vers ce point fixe.

Autrement dit : la 2^e loi de Kepler a montré à Newton que chaque planète est constamment soumise à une force dirigée vers le Soleil.

(2) Si en outre la trajectoire du mobile est une ellipse ayant le point fixe S susmentionné pour foyer, alors la force qui retient ce mobile sur son orbite varie en raison inverse du carré de la distance de ce mobile au point S.

Il ne faut surtout pas oublier de préciser que le point fixe autour duquel la loi des aires est vérifiée se trouve à l'un des foyers de l'ellipse. C'est une condition *sine qua non* pour trouver une force en $\frac{1}{r^2}$. En effet si la force \vec{F} qui retient la planète autour du Soleil (S) était une force centrale donnée par $\vec{F} = k \vec{SP}$, k constante < 0 , l'orbite serait encore une ellipse admettant le point S comme centre et non plus comme foyer (voir schéma ci-dessous).



Dans cette configuration aussi, où l'intensité de la force centrale \vec{F} est proportionnelle à la distance SP , la loi des aires est vérifiée. Mais dans le cas des planètes, le point fixe se trouve au foyer et non au centre de l'ellipse (Document E1 — Boltana/Reilles).

(3) Réciproquement, soit un mobile de masse invariable m soumis constamment à l'action d'une force dirigée vers un point fixe S et variant en raison inverse du carré de la distance de ce mobile au point S. Alors la trajectoire est une conique dont l'un des foyers coïncide avec le point fixe S.

(4) Une fois les propositions (1) et (2) acquises on déduit de la 3^e loi de Kepler que pour chaque planète la force attractive dirigée vers le Soleil a pour intensité :

$$F = \frac{K m}{r^2}$$

où m est la masse de la planète, r sa distance au Soleil et K une constante commune à toutes les planètes.

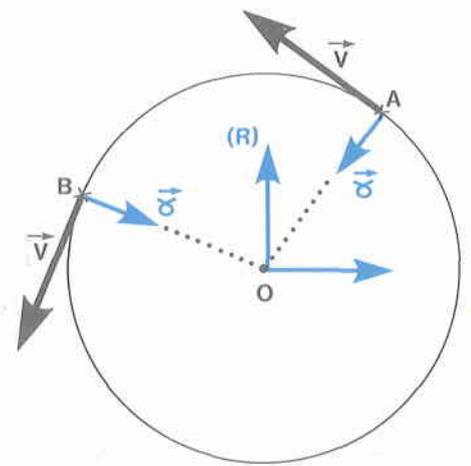
Le résultat souligné, fondamental, nécessite la prise en compte de la 3^e loi de Kepler, dont nous n'avons pas eu besoin pour établir les propositions (1) et (2). Le fait que K ne dépende pas de la planète considérée incite à supposer que K est proportionnel à la masse M du Soleil, ce qui mène tout droit à la loi de la gravitation universelle :

$$F = \mathcal{G} \frac{M m}{r^2}$$

où \mathcal{G} est la constante de la gravitation.

Dans le cas particulier du mouvement circulaire uniforme, Newton met en évidence — comme Huygens avant lui — la présence d'une accélération dirigée vers le centre (dite centripète) de module v^2/r . Il démontre que ce mouvement peut se décomposer en deux mouvements : un mouvement rectiligne (dû à l'inertie) qui se fait à vitesse constante et un mouvement centripète uniformément accéléré. Pour le mobile, il en résulte une trajectoire circulaire, parcourue à vitesse constante, sorte de compromis entre l'éloignement et la chute vers le centre.

On connaît l'exemple classique de la pierre attachée à une ficelle et que l'on met en rotation, au-dessus de sa tête, en déplaçant régulièrement le bras. La force centripète qui maintient la pierre sur sa trajectoire circulaire est ici exercée par notre main qui tient l'extrémité de la ficelle.



Le mouvement circulaire uniforme. Dans ce type de mouvement, rapporté au repère (R) galiléen, la vitesse est constante en intensité mais non en direction.

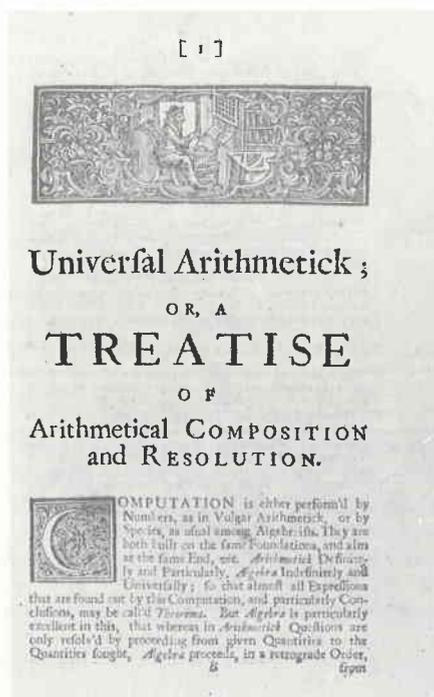
A ce changement de direction, est associée une accélération (dite centripète car dirigée en permanence vers le centre du cercle) de module constant. Elle traduit l'existence d'une force qui tend constamment à maintenir le mobile sur sa trajectoire.

Les distances parcourues sur le cercle en des temps égaux sont égales (d'où l'adjectif « uniforme ») (Document E1 — Boltana/Reilles).

Enfin, dans les *Principes*, Newton expose son système du monde basé sur le concept de gravitation universelle. Contrairement aux forces électriques ou magnétiques (qui seront découvertes plus tard), qui peuvent être attractives ou répulsives, les forces de gravitation sont exclusivement attractives.

A la lumière de ce concept et de sa formulation mathématique (voir encadré p. 14), Newton — exploitant les résultats théoriques précédemment évoqués (lois du mouvement et analyse du mouvement d'un mobile le long d'une trajectoire courbe) — donne son explication du monde : du fait de la gravitation, le Soleil attire les planètes et les contraint à une trajectoire elliptique. De même, c'est en raison de la gravitation que les planètes conservent, autour d'elles, les satellites naturels (la Lune autour de la Terre, les quatre gros satellites de Jupiter, les cinq premiers satellites de Saturne récemment découverts et inconnus de Galilée,...).

(suite en page 11)



Première page d'un traité de mathématiques de Newton publié à Londres en 1720 (Document B.N.).

Les philosophes du XVII^e siècle et la « chute des graves » (*)

Pour aider à saisir le contexte idéologique du XVII^e siècle, il nous semble intéressant de rapporter ici les positions de quelques philosophes quant à la pesanteur et à la mécanique céleste. (Toutes les citations sont extraites de l'ouvrage portant la référence 1.)

« La notion d'attraction, qui implique l'action à distance, est rejetée par **Borelli** (1608-1679). Mais son ouvrage, *Theoricæ Medicearum planetarum ex causis physicis deducta* (Florence, 1666), tient compte de la loi de l'inertie; le mouvement circulaire des planètes entraîne alors l'existence des forces centrifuges que doivent compenser des forces centripètes. La loi d'inertie implique également que l'espace est infini et isotrope. Borelli touche donc presque au but, mais il ne peut l'atteindre car il rejette la notion d'attraction dont l'insuffisance de ses connaissances mathématiques ne lui permettait d'ailleurs pas de tirer toutes les conséquences. » (p. 294)

« Sur le principe même de la pesanteur, **Gassendi** [1592-1655] se sépare de Galilée: la gravité n'est

pas une propriété qui appartient aux corps eux-mêmes. C'est l'attraction de la Terre qui crée la gravité; et cette attraction peut être matérialisée par une chaîne de particules entre un corps et la Terre, selon un modèle inspiré de Kepler.

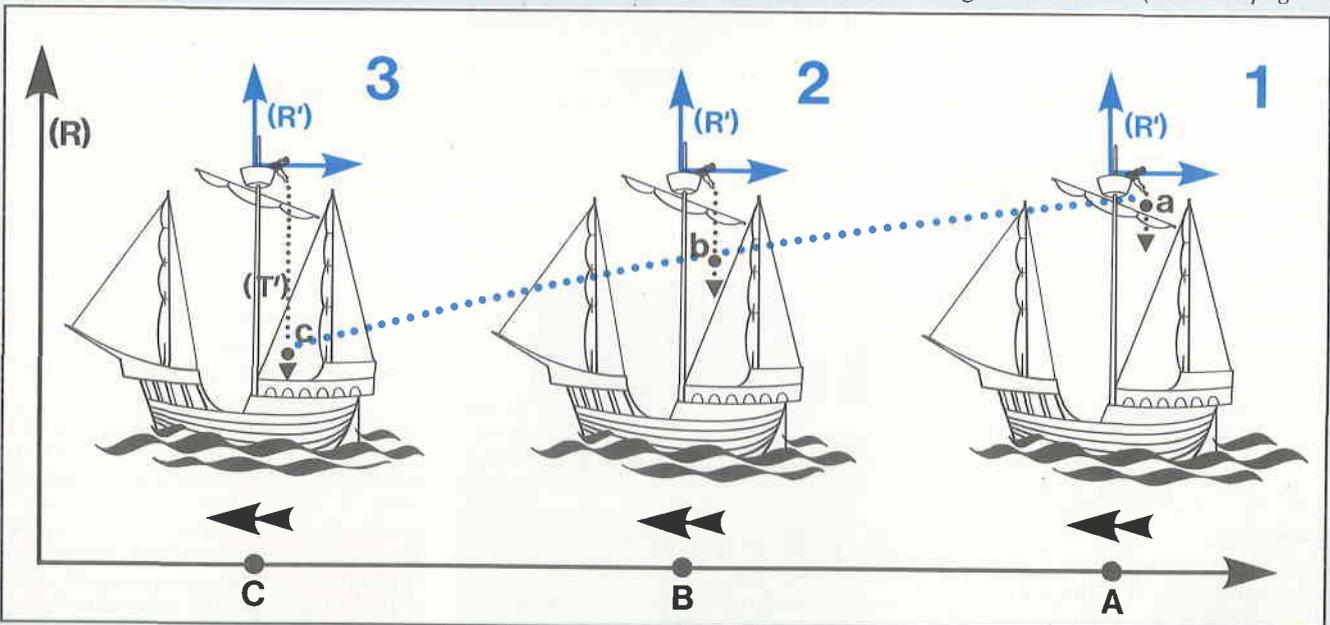


Portrait de Robert Gassendi, dit Gassendi, philosophe, astronome et mathématicien français (Document B.N.).

« Sur le terrain de la mécanique positive et dans le but de réfuter les objections faites au mouvement de la Terre, Gassendi fait effectuer au large de Marseille, en 1640, l'expérience évoquée par Galilée dans ses *Discorsi* et consistant à provoquer la chute d'une pierre du haut du mât d'un navire en mouvement: la pierre retombe au pied du mât, comme Galilée l'avait annoncé contrairement à l'opinion des péripatéticiens. Gassendi explique que la pierre décrit bien une parabole par rapport à des axes liés à la Terre, mais que la composante horizontale de ce mouvement parabolique est inobservable à bord du navire. Il met ainsi en évidence une sorte de *principe de relativité*. » (p. 249)

« Lisant les *Discorsi* de Galilée dès leur apparition, **Descartes** [1596-1650] en fait une critique sévère qu'il confie à Mersenne sous le sceau du secret (11 octobre 1638). Il faut comprendre qu'à cette époque Descartes est déjà entièrement engagé et juge de tout au crible de ses propres principes. Les vérités de la science positive ne l'intéressent plus que dans la mesure où elles peuvent s'insérer dans l'image mécaniste qu'il s'est forgée du monde. (suite en page 11)

(*) Par grave on entendait alors un corps lourd ayant tendance à tomber vers le sol.



Déjà envisagée « mentalement » par Galilée, cette expérience est réalisée sur l'initiative de Gassendi.

En quoi consiste-t-elle ? A étudier le mouvement de chute d'une pierre lâchée du sommet du mât d'un navire.

S'il est évident, pour tout le monde, que la pierre tombera au pied du mât lorsque le navire est immobile, les désaccords surgissent dans le cas d'un navire qui se déplace. La pierre tomberait-elle encore au pied du mât ?

● **Non**, répondent les partisans des Anciens... puisque le navire s'est légèrement déplacé pendant la chute de la pierre. Pour eux, elle devrait donc tomber en arrière de ce mât, plus ou moins loin, selon la vitesse du navire.

● **Oui**, répondent — entre autres — Gassendi et Galilée... puisque la pierre, au début de sa chute, n'est pas au repos par rapport à la Terre mais possède une vitesse horizontale (celle du navire).

Comme dans l'exemple de l'avion (voir p. 4), selon le repère choisi, la trajectoire de la pierre apparaîtra parabolique (dans le repère R) ou rectiligne (la droite T' dans le repère R') (Document E1 — Boltana/Reilles).

(suite de la page précédente)

« C'est ainsi que Descartes rejette successivement toutes les hypothèses sur lesquelles repose la théorie galiléenne de la chute des graves : « Tout « ce que [Galilée] dit de la vitesse des « corps qui descendent dans le vide, « etc., est bâti sans fondement; car il « aurait dû auparavant déterminer ce « que c'est que la pesanteur; et s'il en « savait la vérité, il saurait qu'elle est « nulle dans le vide. » (sic)

« On sait en effet que pour Descartes le vide n'existe pas et que la pesanteur est une sorte de choc des corps contre la matière subtile qui remplit tout l'espace. » (p. 251)

« Pour lui comme pour les Aristotéliens, les corps sont *poussés*,

mais, cette fois, par des tourbillons mécaniques. » (p. 198)

« Renchérissant sur celle de Descartes, la physique de Malebranche [1638-1715] se nourrit de tourbillons en les multipliant à l'infini dans le détail. Le mouvement de la matière éthérée n'est pas limité au cours des grands tourbillons qui entraînent les planètes autour du Soleil, ou les satellites autour des planètes. Dans l'extrême détail, la matière tourbillonne très rapidement. Comme la matière est divisible à l'infini et que le repos n'a point de force, ce sont de petits tourbillons obligés par leur mutuelle résistance à s'ajuster entre eux et à contrebalancer leurs mouvements qui viennent assurer la cohé-

sion des corps durs dont ils compriment les parties. [...] Les *petits tourbillons* expliquent les effets du tonnerre, de la poudre à canon ainsi que la génération du feu et les réactions chimiques.

« La pesanteur est, pour Malebranche, un phénomène hydrostatique qui a son siège dans l'éther. » (p. 262) ■

(Nous tenons à remercier les *Presses universitaires de France* de nous avoir accordé gracieusement l'autorisation de reproduire ces extraits de leur ouvrage *La science moderne, Histoire générale des sciences, tome 2, PUF, Paris, 1958.*)

(suite de la page 9)

Pour Newton, cette loi est valable partout : toute chose attire toute chose, les corps célestes sont constamment en interaction, autrement dit en « chute libre » permanente, aussi peut-on parler de **gravitation universelle** (21).

Pour illustrer sa théorie, Newton va concentrer toute son attention sur la Lune. Il est persuadé que l'attraction terrestre s'exerce également jusqu'à la Lune. Mais dans ce cas, pourquoi ne tombe-t-elle pas ?

Son idée est la suivante : la Lune « tombe » au même titre qu'un objet qui, lâché de notre main, se dirige vers le sol. Mais si la Lune échappe au sort de l'objet, c'est qu'elle a reçu — jadis — une impulsion (22) qui lui a conféré, en vertu de la loi d'inertie, un mouvement rectiligne uniforme. Exposée, par ailleurs, à l'attraction terrestre (et à son mouvement uniformément accéléré), la Lune décrit donc une trajectoire qui résulte de ces deux événements (le premier qui appartient au passé et a pris fin mais dont les conséquences se font toujours sentir, le second qui a un caractère permanent) : leur conjugaison est à l'origine du mouvement pratiquement circulaire uniforme que l'on constate.

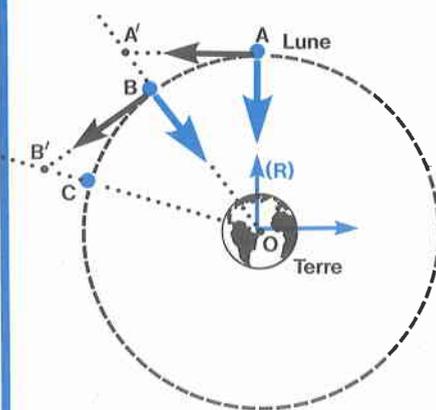
(21) Le verbe *graviter*, employé depuis pour les astres ou les satellites artificiels, signifie d'ailleurs : obéir aux lois de la gravitation.

(22) D'où vient cette impulsion initiale appliquée à la Lune (ainsi qu'aux planètes) ? Newton y vit la preuve de l'existence de Dieu. (Réf. 2, p. 162) D'autres, plus tard, invoqueront le mouvement de rotation du nuage de poussières ayant conduit à la formation des astres du système solaire. Étant en rotation, ce nuage a donné naissance à des corps célestes également en rotation. Mais pourquoi ce nuage tournait-il sur lui-même ? Ce problème ne peut s'étudier que dans le cadre de modèles cosmologiques globaux.

Deux siècles après Newton, Jules Verne fera dire à son héros Michel Ardan : (...) *les planètes ne sont que des projectiles, de simples boulets de canon lancés par la main du Créateur.* (De la terre à la lune, Livre de poche, n° 2026, 1980, p. 235)

La Lune est en chute libre...

Considérons la Lune alors qu'elle se trouve au point A.



Si la gravitation universelle était subitement supprimée, elle aurait un mouvement purement inertiel : dans le repère géocentrique (R), supposé galiléen, elle se déplacerait en ligne droite. Une seconde plus tard, elle serait en A' (par souci de clarté, on a énormément exagéré l'angle AOA').

Mais la gravitation existe et la Terre exerce son attraction sur la Lune ce qui a pour effet de perturber le mouvement inertiel et de la contraindre à décrire une ellipse (en réalité très voisine du cercle) : la Lune ne va pas de A en A' mais de A en B.

Tout se passe donc comme si, du fait de l'attraction terrestre, la Lune tombait vers la Terre, d'une hauteur A'B' chaque seconde. Cette hauteur, calculée par Newton, vaut approximativement 1,36 mm (Document E1 — Boltana/Reilles).

Et quand on dit que **la Lune tombe**, comme la pomme de la légende, il faut entendre qu'elle s'écarte de la ligne droite qu'elle suivrait si subitement l'attraction terrestre et les autres influences gravitationnelles n'agissaient plus.

(Insistons bien sur le fait qu'une seule force est responsable du mouvement de la Lune autour de la Terre, la force d'attraction terrestre.

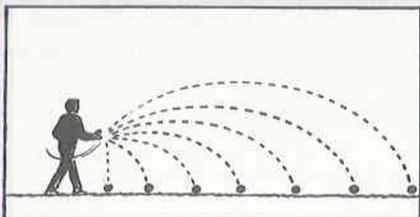
C'est un abus de langage, pour ne pas dire une erreur, que de rendre compte du mouvement de la Lune ou d'un satellite artificiel — rapporté à un repère terrestre — en invoquant la compensation de deux forces égales et opposées : la force d'attraction terrestre et une force d'inertie centrifuge. Celle-

ci est une *force particulière* que les physiciens ne font intervenir que dans des cas bien précis (lorsque le repère n'est pas galiléen). Par exemple, dans le cas de la Lune, elle n'a de sens que dans un repère lié à la Lune et en rotation par rapport à un repère centré sur la Terre.

Cet aspect sera développé dans le prochain numéro d'Espace Information sur l'impesanteur.)

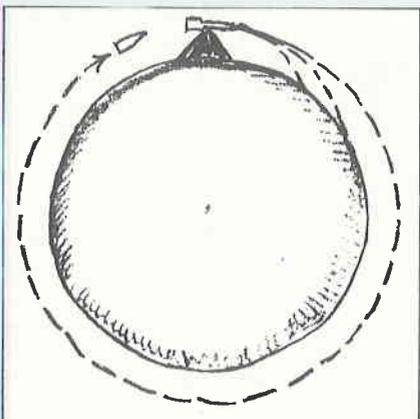
Et pour vérifier son hypothèse, Newton effectue le fameux **test de la Lune**. C'est-à-dire qu'il cherche à évaluer la force attractive que la Terre exerce sur la Lune dont l'effet est d'écarter celle-ci de la trajectoire rectiligne qu'elle aurait (dans un repère galiléen) si le mouvement était purement inertiel.

Du caillou... au satellite !



Comme Galilée l'a démontré, tout projectile suit théoriquement une trajectoire parabolique dès lors qu'il est lancé avec une vitesse initiale qui n'est ni nulle ni verticale (On raisonne dans un repère terrestre supposé galiléen.)

Cependant la portion d'espace mise en jeu doit être suffisamment restreinte pour qu'on puisse supposer uniforme le champ gravitationnel (Document extrait de l'ouvrage *Prodigieux Cosmos*, par J.-C. Pasquiez. © by Éditions Casterman).



Dans le cas d'une impulsion initiale de plus en plus forte, le projectile retombe de plus en plus loin jusqu'à décrire une trajectoire qui ceinture la Terre : il est devenu satellite artificiel de la Terre.

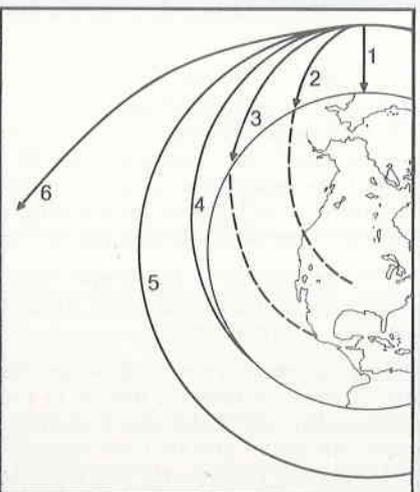
Ici, contrairement au cas précédent, le champ gravitationnel n'est plus uniforme : \vec{g} varie en direction et en intensité tout en restant dirigé vers le centre de masse de la Terre : un tel champ est dit central.

Newton a démontré que de telles trajectoires étaient des coniques. (On raisonne dans un repère géocentrique supposé galiléen.)



Parue dans les *Principes*, cette gravure illustre la possibilité entrevue par Newton de créer un satellite artificiel de la Terre.

Les mouvements sont rapportés à un repère géocentrique — c'est-à-dire centré sur la Terre — supposé galiléen (Document B.N., photographie Larousse).



Ce schéma regroupe l'ensemble des possibilités qui s'offre à un projectile lancé avec une vitesse tangente à la surface terrestre (on raisonne dans un repère géocentrique supposé galiléen) :

- pour une vitesse nulle, la chute se fait selon la verticale (1);
- pour de faibles valeurs de la vitesse, la trajectoire est elliptique et intercepte la Terre (2, 3, 4);
- pour une valeur donnée de la vitesse (ce qu'on appelle la première vitesse cosmique), la trajectoire est circulaire (5);
- pour des valeurs supérieures, la trajectoire devient une courbe ouverte (parabole ou hyperbole) : le projectile quitte le voisinage de la Terre (6); ce n'est plus un satellite artificiel de la Terre mais une sonde spatiale (Document NASA).

Connue au niveau de la Terre, calculable au niveau de l'orbite lunaire, l'intensité de cette force peut-elle rendre compte de cet écart (23) ? Les résultats obtenus à partir de 1684 par Newton le prouvent d'une façon irréfutable.

Ainsi que l'écrivait le poète Paul Valéry : « Il fallait être Newton pour apercevoir que la Lune tombe quand tout le monde voit bien qu'elle ne tombe pas ».

Idée profondément originale de la théorie newtonienne : l'attraction est mutuelle. Ce qui signifie, par exemple, que si le Soleil attire la Terre, la Terre — elle aussi — attire le Soleil avec une force de même intensité (24). Et de même pour les autres corps célestes « pas trop éloignés ».

Dans le cas du système solaire, un corps céleste donné agit sur tous les autres corps célestes mais, en retour, subit leur action. Il en résulte des perturbations dans sa trajectoire d'où les écarts que l'on constate entre la trajectoire réelle d'un corps et l'ellipse théorique de Kepler (on sait que l'étude de telles perturbations est à l'origine des découvertes de Neptune en 1846 et de Pluton en 1930).

(23) Pour cela Newton calcule et compare les distances de chute parcourues en une seconde par un objet à la surface de la Terre et par la Lune. D'après la formule : $e = 1/2gt^2$, un corps qui tombe librement à proximité du sol parcourt dans la première seconde 4,9 mètres. La Lune est éloignée de la Terre d'environ 60 rayons terrestres. A une telle distance, un corps tombera, en une seconde, de 4,9 m : $(60)^2$ soit $\approx 1,36$ mm. Et c'est effectivement d'une telle hauteur que la Lune « tombe », c'est-à-dire s'écarte — du fait de l'attraction terrestre — du mouvement rectiligne qu'elle suivrait en son absence.

Pour mener à bien ce calcul, Newton a dû attendre de disposer de mesures correctes du rayon terrestre (estimation de la valeur du méridien terrestre — mission Picard — disponible en Angleterre vers 1682 ou 1684) et de la distance Terre/Lune et inventer l'analyse infinitésimale (en même temps que Leibniz). Il a en particulier établi que l'attraction d'un corps par une sphère homogène est identique à celle d'une sphère dont toute la masse serait concentrée en son centre géométrique. Autrement dit, la Terre agit comme si toute sa masse était concentrée en son centre.

(24) Une question un peu hâtive pourrait être : si la force attractive qu'exerce la Terre sur le Soleil est égale à celle qu'exerce le Soleil sur la Terre, pourquoi est-ce la Terre qui « cède » et se met à tourner autour du Soleil et non pas le contraire ?

Un juste examen de ce problème exigerait que l'on raisonne dans un repère approprié, par exemple barycentrique (le barycentre étant le point autour duquel les deux corps gravitent véritablement). Néanmoins, au prix de quelques simplifications, on peut fournir une réponse sommaire.

Les deux forces sont de même intensité, certes, mais il faut considérer les masses sur lesquelles elles agissent. Celle du Soleil étant 330 000 fois plus forte que celle de la Terre, il en résulte une accélération du Soleil 330 000 fois plus faible. Et si les deux corps tombent l'un vers l'autre, la Terre le fait avec une accélération 330 000 fois plus forte de telle sorte qu'en première approximation on peut considérer comme négligeable le mouvement contraire.

Bien sûr, on ferait le même raisonnement avec la pomme et la Terre qui s'attirent aussi mutuellement. Et il est vrai que, du point de vue théorique, la pomme attire également la Terre lors de son très bref mouvement de chute vers le sol.

Mais Newton ne s'en tient pas là quant aux conséquences de la gravitation universelle. Il élabore aussi une théorie rendant compte du phénomène des marées océaniques, donne l'interprétation de la précession des équinoxes, évalue l'aplatissement de la Terre à $1/230$ (valeur admise aujourd'hui $\approx 1/298$), étudie la variation de la pesanteur avec la latitude, donne l'explication du mouvement des comètes, indique les conditions du retour périodique de certaines d'entre elles, etc.

« L'ensemble de ces découvertes, traçant la marche ultérieure de toute la mécanique céleste, a quelque chose de véritablement prodigieux. » (Réf. 1, p. 269)

Quel fut l'accueil fait aux idées de Newton par ses contemporains ? « (...) l'hypothèse artificielle d'une action à distance rebute par son caractère irrationnel, presque magique ». (Réf. 1, p. 478) « Leibniz lui-même se hérisse contre la *vis attractiva* (25) (...) et contre la résurrection des qualités scolastiques et les puissances chimériques. » (Réf. 1, p. 204) A Huygens, cette *vis attractiva* apparaît comme une absurdité. Et Malebranche proclame que les savants se rendraient ridicules s'ils supposaient des mouvements d'attraction et des facultés attractives pour expliquer d'où vient que les chariots suivent les chemins qui y sont attelés.

Chez Newton lui-même, on sent l'embarras de l'homme de son temps devant une nomenclature qui n'est pas encore claire. Le savant doit supposer ces forces. Sont-elles à proprement parler une réalité ? Manifestement il hésite. Pas plus que ses adversaires cartésiens, il n'admet l'action à distance d'un corps sur un autre. Les attractions et les répulsions ont une cause qui ne réside pas dans ces corps eux-mêmes. Mais le physicien n'a pas à s'en occuper. Aussi dans le passage de l'*Opticks* (...) précise-t-il aussitôt : « Je n'examine point ici quelle peut être la cause de ces attractions... Je n'emploie ici ce mot d'attraction que pour signifier en général une force quelconque, par laquelle les corps tendent réciproquement les uns vers les autres, quelle qu'en soit la cause. » (Réf. 1, p. 204)

Dans la deuxième édition des *Principes*, en 1713, il écrira encore : « J'ai expliqué jusqu'ici les phénomènes célestes et ceux de la mer par la force de la gravitation, mais je n'ai assigné nulle part la cause de cette gravitation... Je n'ai pu encore parvenir à déduire des phénomènes la raison de ces propriétés

de la gravité et je n'imagine point d'hypothèse. Car tout ce qui ne se déduit point des phénomènes est une hypothèse : et les hypothèses, soit métaphysiques, soit physiques, soit mécaniques, soit celle des qualités occultes, ne doivent pas être reçues dans la philosophie expérimentale. » (Réf. 1, p. 270)

« Écrivant à Bentley, son premier sectateur religieux, Newton craint de le voir glisser jusqu'à faire de la gravité une qualité au sens scolastique : « Vous parlez parfois de la gravité comme essentielle et inhérente à la matière. Je vous en prie, ne m'attribuez pas cette

notion; car je ne prétends pas connaître la cause de la gravité, et j'aurais besoin de plus de temps pour la considérer. » (Réf. 1, p. 273)

Le succès de ses idées vint lentement. Mais les réfractaires durent reconnaître les faits, d'abord en 1737 (lorsque l'aplatissement de la Terre — conformément à la théorie de Newton — fut établi), ensuite et surtout à la fin de l'année 1758, lorsque revint la comète de Halley (comme le laissait prévoir la théorie de Newton et ainsi que le calculèrent Clairaut et Lalande).

L'œuvre inachevée d'Einstein

Il est évident qu'en dépit de ses succès remarquables, la théorie de Newton laisse quelques questions en suspens : l'action de la gravitation se transmet-elle d'une façon instantanée ? Sinon, avec quelle vitesse ? Comment expliquer l'identité entre la masse d'inertie d'un corps et sa masse gravitationnelle ? Existe-t-il un espace absolu, un cadre privilégié jouant le rôle de référence pour tous les expérimentateurs et pour toutes les mesures ? Le temps, lui-même, s'écoule-t-il d'une façon identique en tous points de l'univers ? Existe-t-il un temps unique, régulier, privilégié, commun à tous les observateurs de l'univers, un temps pouvant constituer une référence universelle ?

Les réponses à ces questions — et d'autres nouveautés — surgirent du bouleversement sans précédent que connut la physique, au début du XX^e siècle, du fait d'un certain nombre d'expériences et de spéculations.

Le principal auteur de ce grand chambardement fut le physicien allemand Albert Einstein (1879-1955, naturalisé américain en 1940), avec une série de travaux publiés coup sur coup en 1905. L'un de ces articles, consacré à l'effet photoélectrique, lui vaudra le prix Nobel pour l'année 1921. Deux autres articles, intitulés *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement* et *L'inertie d'un corps dépend-elle de sa capacité d'énergie ?* fondent la théorie de la relativité restreinte et dégagent ses conséquences sur la dynamique des particules.

Dans le premier des deux articles consacrés à ces problèmes, l'auteur montre que les profondes difficultés rencontrées par les physiciens du XIX^e siècle pour interpréter les phénomènes de propagation de la lumière dans le

vide et dans les milieux transparents s'évanouissent complètement à condition d'introduire deux postulats :

Premier postulat : tous les systèmes de référence galiléens (26) (entendez par là : les systèmes de référence dans lesquels la loi d'inertie est vérifiée) sont équivalents pour décrire non seulement les phénomènes mécaniques, mais aussi les phénomènes électromagnétiques. C'est le **principe de relativité restreinte** (restreinte parce que l'équivalence est postulée pour une classe privilégiée de systèmes de référence).

Deuxième postulat : la vitesse de la lumière dans le vide est une constante indépendante de la vitesse relative de la source par rapport à l'observateur. La valeur de cette vitesse est la même dans tous les systèmes galiléens. C'est une constante universelle, désignée par la lettre *c*, $c \approx 300\,000$ km/s.

Einstein établit que ces deux postulats, l'un et l'autre en bon accord avec les expériences réalisées au XIX^e siècle, sont totalement compatibles à condition d'abandonner deux hypothèses fondamentales de l'électrodynamique et de la mécanique newtonienne :

1. L'hypothèse de l'éther, conçu comme un milieu élastique très ténu susceptible de propager les vibrations électromagnétiques, comme l'air transmet les vibrations sonores.

2. L'hypothèse du caractère absolu de la simultanéité de deux événements distants l'un de l'autre. En introduisant une définition opérationnelle de la synchronisation des horloges liées à un sys-

(suite en page 19)

(26) Les systèmes de référence galiléens sont en mouvement rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres.

(25) *Vis attractiva* : force attractive.

La pesanteur, une grandeur variable

On appelle **gravitation** le phénomène physique en vertu duquel les corps s'attirent mutuellement.

Dans le cas simple de deux corps (à symétrie sphérique) en présence, le module de la force attractive que chacun d'eux exerce sur l'autre est donnée par la relation :

$$F = G \cdot \frac{M \cdot m}{R^2} \quad (\text{relation 1}) (*)$$

où M et m désignent les deux masses, R la distance de leur centre et G la **constante de la gravitation universelle** ($\approx 6,67 \cdot 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$).

Cette constante a été mesurée expérimentalement, pour la première fois, par l'Anglais H. Cavendish en 1798 (sa célèbre balance de torsion figure dans la plupart des livres scolaires). On a dit de son expérience qu'elle avait été la première à permettre de *peser le monde*.

Il est remarquable que cette constante, mise en évidence et mesurée dans le système solaire, soit valable en tous points de l'univers et rende aussi bien compte de la chute d'une pomme en Normandie que... de l'attraction réciproque de deux étoiles dans un système double à l'autre extrémité de la Galaxie !

Dans notre environnement quotidien, ces forces attractives ont — la plupart du temps — une intensité très faible (1) et leurs effets sont inobservables... sauf lorsqu'un des deux objets en présence possède une masse considérable, et tel est le cas de la Terre. Aussi est-ce pour cette raison que nous ne voyons pas les objets, abandonnés à eux-mêmes, se précipiter les uns vers les autres... mais tomber sur le sol.

Quand l'un des deux corps en présence est un astre, on désigne généralement par **pesanteur** (2) l'attraction qu'il exerce sur tout objet de son voisinage.

On appellera **poinds** (3) la force attractive qui conduira le corps le plus léger à tomber sur celui-là.

Comment caractériser cette pesanteur ? Par quelle grandeur physique la représenter ? Considérons la force attractive existant entre un astre de masse M et un corps quelconque, plus léger, de masse m , éloignés d'une distance R .

(*) N'oublions pas que la force est une grandeur vectorielle et que deux autres caractéristiques sont généralement associées au module, sa direction et son sens.

(1) Par exemple, on calcule que la force d'attraction newtonienne existant entre deux masses de 1,2 t distantes de 10 m est d'environ 0,000001 N. Ce qui correspond à peu près au poids d'une masse de... 0,1 mg à la surface terrestre.

Quelle est l'accélération associée ? Environ $10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$. C'est là une valeur bien faible comparée à celle qui résulte de l'attraction de chacune de ces masses par la Terre...

Par ailleurs, on a pu établir — dans le cas d'électrons — que la force newtonienne est beaucoup plus faible (d'un facteur $4 \cdot 10^{42}$ environ) que la force électrique répulsive qui s'exerce entre eux.

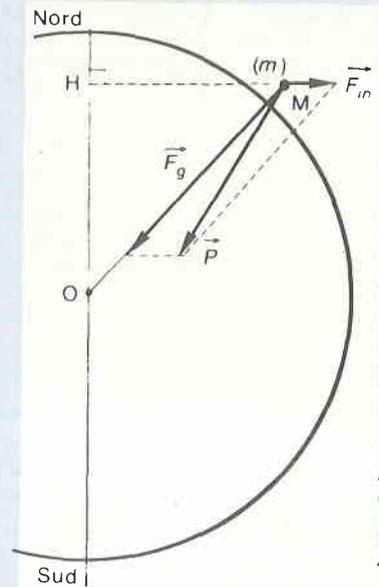
(2) En toute rigueur, la *pesanteur* désigne la somme de la gravité et de la force d'inertie d'entraînement due à la rotation de l'astre sur lui-même (voir schéma).

Il conviendrait donc de distinguer G , la valeur du *champ de gravitation*, exprimée en $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ (si l'on considère les aspects statiques) et g , la valeur du *champ de pesanteur*, exprimée en $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ (si l'on considère les aspects dynamiques).

Mais dans la pratique on ne fait généralement pas de distinction entre *pesanteur* et *gravité* en raison de leur différence relativement faible dans le cas des planètes du système solaire.

(3) Selon le *Conseil international de la langue française*, qui a édité un *Vocabulaire des sciences et techniques spatiales* (La maison du dictionnaire, Paris, 1978), il convient de rapprocher, d'une part, *pesanteur* et *gravifique*, d'autre part, *gravité*, *gravitation* et *gravitationnel*.

(4) Espace dans lequel la force d'attraction d'un astre l'emporte sur celle des astres voisins.



Le poids d'un corps de masse m situé en M se compose de la force de gravitation (F_g) et d'une force d'inertie d'entraînement (F_{in}).

L'intensité de cette force d'inertie varie avec la latitude (elle dépend de la distance HM) : elle est nulle aux pôles et maximale à l'équateur. Dans ce cas, l'accélération qui lui est associée vaut $3,3 \cdot 10^{-2} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; elle est donc 300 fois plus faible que celle de la pesanteur.

On calcule ainsi que si la Terre tournait 17 fois plus vite, le poids de tout objet serait nul à l'équateur du fait de cette compensation (Document extrait de *Fondements de la physique*, Coll. A. Cros, *Term. CE*, © Belin, 1980).

Le module de cette force est donnée par la relation 1. Mais la deuxième loi de Newton (cf. p. 8) permet de l'exprimer d'une autre manière, et si l'on appelle g l'accélération de la pesanteur créée par l'astre, on peut écrire (en raisonnant sur les scalaires) :

$$F = G \cdot \frac{Mm}{R^2} = mg$$

ce qui conduit à :
$$g = \frac{GM}{R^2} \quad (\text{relation 2})$$

C'est cette grandeur g qui caractérisera un astre, du moins pour tous les problèmes de chute des corps et les phénomènes gravitationnels. Voyons-en la signification exacte avec l'exemple de la Terre.

La pesanteur terrestre

La grandeur g caractérise l'accélération que la Terre communique à tout objet évoluant dans sa *gravisphère* (4). C'est le fameux « usage » reconnu par Galilée (cf. p. 4).

Remarque fondamentale : l'expression de g est indépendante de la masse du corps attiré. Tous les corps, quels qu'ils soient (satellites artificiels, Lune, objets quotidiens,...), sont soumis à la même loi de chute ou du moins le seraient si des forces extérieures (résistance de l'air, frottement,...) ne perturbaient leur mouvement. Quelle est la valeur de g ?

En première approximation, on peut considérer la Terre (masse $\approx 6 \cdot 10^{24} \text{kg}$) comme sphérique (rayon moyen $\approx 6378 \text{km}$) et négliger les forces attractives de la Lune et du Soleil. Dans ces conditions, la relation 2 conduit à une valeur moyenne de l'accélération de la pesanteur terrestre au niveau de la mer :

$$g_0 (\text{Terre}) \approx 9,81 \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

(suite en page 15)

(suite de la page 14)

En réalité, la Terre n'est pas sphérique mais ellipsoïdale (cf. El, n° 8, p. 7), son rayon équatorial étant supérieur à son rayon polaire d'une vingtaine de kilomètres. Il en découle une **variation de g avec la latitude** du lieu de la mesure; d'où les valeurs suivantes : 9,780 à l'équateur; 9,786 à 20°; 9,801 à 40°; 9,819 à 60° et 9,832 au pôle.

(Bien entendu, ces valeurs englobent à la fois l'effet de l'aplatissement du globe terrestre aux pôles et l'effet centrifuge de la rotation de la Terre. L'écart de 0,05 m.s⁻² sur les valeurs à l'équateur et aux pôles est dû pour 2/3 à l'effet centrifuge et pour 1/3 à la forme ellipsoïdale de la Terre.)

La relation 2 le montre, g varie aussi avec l'éloignement des centres de masse des deux corps en présence, autrement dit **l'altitude du corps attiré**.

Si h est l'altitude du corps soumis à l'attraction terrestre et R le rayon terrestre, on a :

$$g_h = g_0 \left(\frac{R}{R+h} \right)^2$$

Pour les faibles altitudes ($h \ll R$), on a :

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{-2h}{R} \quad (\text{relation 3})$$

avec $\Delta g = g_h - g_0$

(Le signe moins rappelant que **l'accélération de la pesanteur diminue quand on s'élève**.) On calcule ainsi aisément que g diminue de 1 % quand on s'élève de 32 km et qu'à l'altitude de 300 km (à laquelle gravitent généralement les stations orbitales) on a encore : $g \approx 0,9.g_0$. Contrairement à une idée malheureusement fort répandue, l'attraction de la Terre, à ce niveau, n'a pas du tout disparu !...

Cette mise en évidence de la variation de g avec divers paramètres nous donne l'occasion de revenir sur la notion de poids et d'insister sur la **distinction fondamentale qu'il y a lieu de faire entre le poids et la masse**.

La **masse d'un objet** (c'est un scalaire) correspond à la quantité de matière qu'il renferme. C'est une constante, absolument indépendante du lieu considéré, qui caractérise l'objet et qu'on exprime en kilogrammes (symbole : kg).

Le **poids de cet objet** (c'est une force) correspond à l'attraction qu'un astre — par exemple la Terre — exerce sur cette masse (selon la relation de Newton : $\vec{P} = m\vec{g}$). Et g étant une grandeur variable en fonction du lieu (g varie d'une planète à l'autre, et, pour une même planète, avec l'altitude et même la latitude dans le cas de la Terre), **le poids sera aussi une grandeur variable**, dépendant du lieu considéré. On l'exprime en newtons (symbole : N).

C'est ainsi qu'on dira que tel livre a une masse de 2 kg (c'est vrai en tous points de l'univers... tant qu'on ne lui arrache pas ses pages!) mais que son poids est de 19,62 N à Paris au niveau du sol, d'environ 19,61 N au sommet du mont Blanc, de 19,66 N au pôle Nord et qu'il serait proche de 3,2 N sur la Lune et de 7,4 N sur Mars (voir paragraphe suivant).

Pendant longtemps, en France, a régné la plus sombre confusion en ce domaine en raison du choix — peu heureux — d'une unité de poids ayant une valeur locale : le kilogramme-poids (k_{gp}) étant le poids (mesuré à Paris et à l'altitude 0) d'une masse étalon de 1 kg. (Sous le nom de kilogramme-force, k_{gf}, c'était aussi une unité de force.)

Le côté positif de cette convention est évident : une masse de 3 kg a (à Paris et à l'altitude 0) un poids de... 3 k_{gp}!, masse et poids s'exprimant par le même nombre (ce qui entretient la confusion entre les deux notions). Mais cette belle correspondance ne vaut que si g ne change pas, autrement dit si toutes les mesures s'effectuent au même lieu.

Et c'est là que les choses se compliquent. Que devient le poids de cette masse étalon de 1 kg mesuré sur la Lune ? 1 k_{gp} ?

Oui... si l'on définit une nouvelle unité valable sur la Lune (le poids d'une masse étalon de 1 kg, et dans ce cas le k_{gp} de Paris n'a plus rien à voir avec le k_{gp} lunaire; il reste cependant une équivalence entre les deux);

Non... si l'on souhaite faire ressortir les différences de l'accélération de la pesanteur sur la Terre et sur la Lune et conserver l'unité définie à Paris. Dans ce cas, la masse étalon ne pèsera plus que 0,15 k_{gp} environ.

Aujourd'hui l'unité de poids (et de force) est le **newton** qui a une valeur universelle. Le newton terrestre étant identique au newton lunaire ou martien : c'est la force qui communique à une masse de 1 kg une accélération de 1 m.s⁻².

(Pour les passéistes, rappelons l'équivalence valable en tout lieu : 1 k_{gp} \approx 9,81 N.)

(suite en page 16)

2. Le poids d'un objet varie suivant l'endroit où il se trouve La masse d'un objet ne varie pas



(Document extrait de Sciences Physiques 6^e, par Y. Michaud et Y. Le Moal, avec l'aimable autorisation des Éditions Magnard, 1981).

(suite de la page 15)

La pesanteur des principaux autres corps du système solaire

A proximité d'un corps céleste, la principale force qui s'exerce sur une masse est la force de gravitation dirigée vers son centre.

Dans tous les cas, on considérera que la répartition de la masse est à symétrie sphérique, le champ de pesanteur se calculant comme si toute la masse était concentrée au centre.

• La Lune

La conquête lunaire nous a familiarisés avec ces images d'astronautes aux pas hésitants, à la démarche malaisée, semblant rebondir sur le sol de notre satellite. La raison ? La faiblesse relative du champ de pesanteur lunaire ($R \approx 1738$ km et $M \approx 1/81$ de celle de la Terre) : au niveau du sol, on a g_0 (Lune) $\approx 1,62$ m.s⁻² soit 0,16 g_0 (Terre).

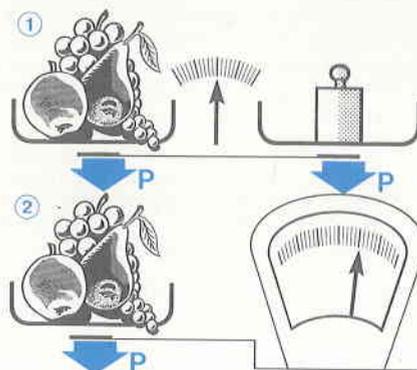
Sur la Lune, un astronaute (sa masse est demeurée la même) a donc la sensation d'être six fois plus léger que sur Terre. Il lui faut donc habituer son organisme, en particulier ses muscles, qui commandent ses déplacements, à ce nouvel environnement.

Ci-contre : le capitaine Haddock fait la découverte de la faible gravité lunaire (Extrait de On a marché sur la Lune, par Hergé, © by Éditions Casterman, 1954).

Ci-dessous, à droite : autre technique de simulation visant à priver l'astronaute des 5/6 de son poids terrestre afin de le préparer aux activités à la surface de la Lune (Document NASA).

Ci-dessous : une des techniques de simulation de la pesanteur lunaire employée aux États-Unis. Grâce à un système de câbles, l'astronaute n'exerce sur la paroi oblique que le sixième de son poids terrestre (Document NASA).

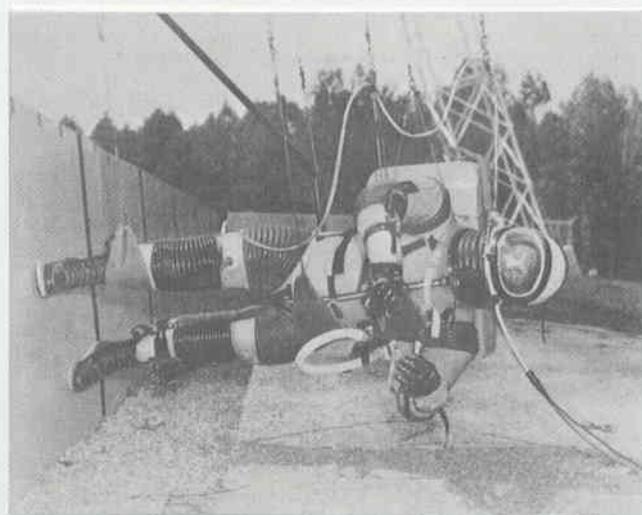
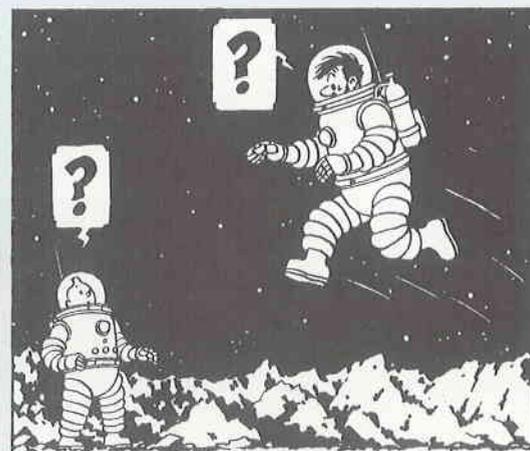
Une expérience imaginaire



Au XXII^e siècle, alors que la Lune est depuis longtemps colonisée par les Terriens, un commerçant s'apprête à quitter la Terre pour livrer un client important.

Il pèse ses fruits « exotiques » avec une balance à plateaux (1) puis, par précaution, vérifie avec une balance du type dynamomètre (2).

Parvenu sur la Lune, il renouvelle ses pesées : la balance (1) donne le même résultat tandis que la balance (2) indique une valeur six fois plus faible que sur Terre (Document EI — Boltana/Reilles).



(suite en page 17)

(suite de la page 16)

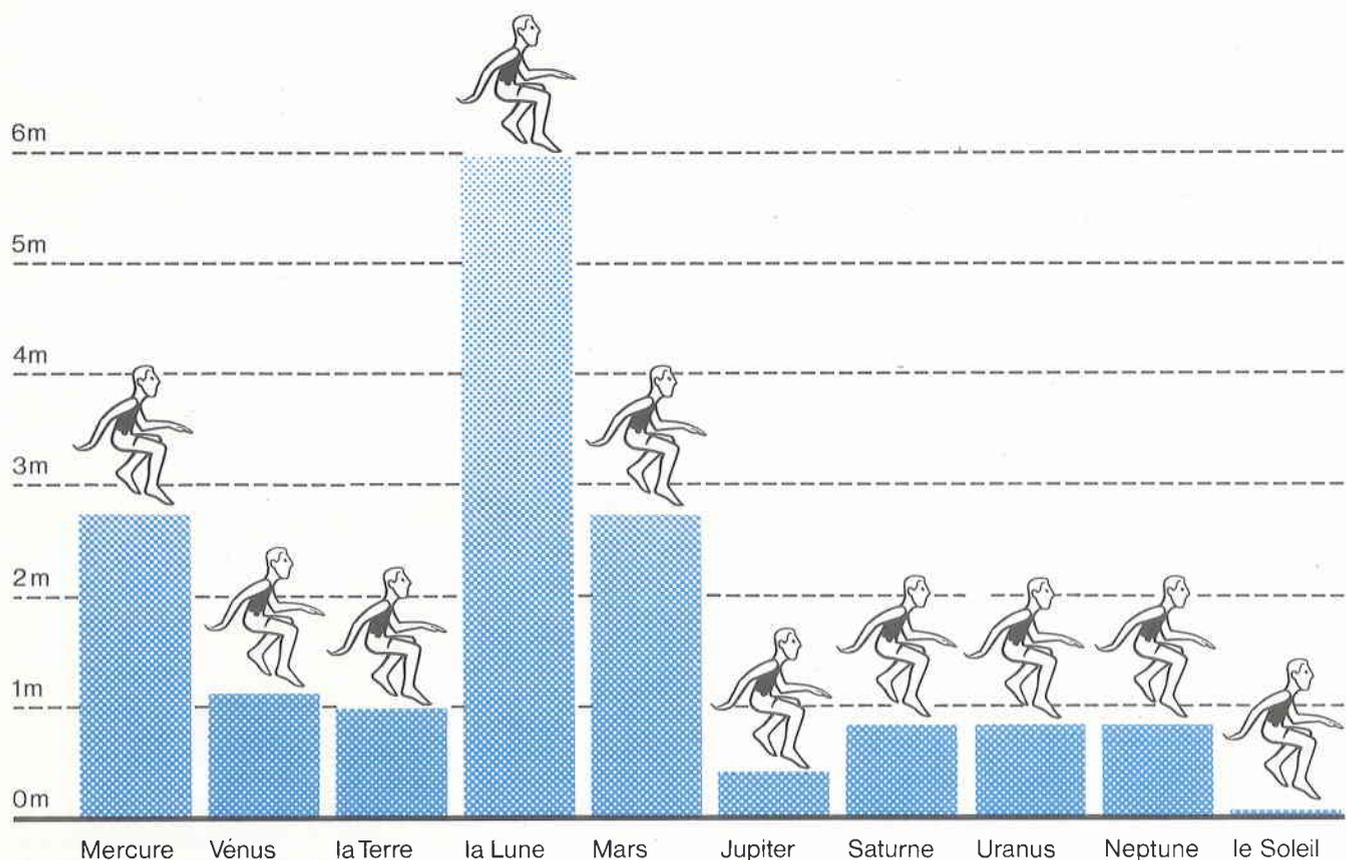
• Le Soleil et les planètes

Nous regrouperons dans un tableau les valeurs de leur rayon

équatorial, de leur masse (rapportée à celle de la Terre) et de l'accélération de la pesanteur (rapportée à celle de la Terre) soit à leur surface, soit au sommet des nuages (pour les planètes géantes).

| | Soleil | Mercure | Vénus | Mars | Jupiter | Saturne | Uranus | Neptune | Pluton |
|-----------------------|---------|---------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|----------|
| Rayon équatorial (km) | 695 500 | 2 440 | 6 052 | 3 373 | 71 400 | 60 000 | 25 900 | 24 750 | 3 000(?) |
| Masse (Terre = 1) | 332 000 | 0,055 | 0,815 | 0,108 | 317,9 | 95,2 | 14,6 | 17,2 | 0,1 (?) |
| g (Terre = 1) | 28 | 0,37 | 0,88 | 0,38 | 2,64 | 1,15 | 1,17 | 1,18 | ? |

(Source : *Les étoiles, le système solaire*, Bureau des longitudes, Gauthier-Villars, 1977, p. 60.)



Expérience fictive destinée à comparer entre elles les valeurs de la pesanteur dans le système solaire.

Soit un jeune sportif capable, sur Terre, de franchir une barrière de 1 m. En supposant l'expérience possible sur les autres corps célestes (existence d'une surface solide, utilisation d'un scaphandre très léger permettant la survie,...), un même effort le conduirait à des performances variant de 6 m (sur la Lune) à... 4 cm (sur le Soleil) (Document E1 — Boltana/Reilles).

A propos des planètes, rappelons qu'on démontre que g entre dans l'expression du calcul de la vitesse de libération des corps célestes. On appelle ainsi la vitesse que doit atteindre un objet quelconque (véhicule spatial, molécule gazeuse,...) pour pouvoir se soustraire à l'attraction de l'astre. Elle s'exprime par la relation : $V_{lib} = \sqrt{2g_0R}$ (voir E1, n° 12, p. 8). Cette grandeur vaut

11,2 km/s pour la Terre et 2,4 km/s pour la Lune.

C'est là une notion importante en astronautique mais aussi en physique planétaire (pour rendre compte de l'aptitude ou de l'inaptitude des astres à conserver une atmosphère gazeuse).

(suite en page 18)

(suite de la page 17)

La pesanteur... au-delà du système solaire

L'accélération du champ de pesanteur peut, dans certains cas, atteindre des valeurs considérables. Le meilleur exemple en est sans doute donné par ces corps célestes supermassifs que constituent les *trous noirs*. Ce sont d'hypothétiques entités astronomiques qui résulteraient de l'écroulement gravitationnel d'astres de grande masse (supérieure à environ 2,5 fois la masse solaire). Ce serait le stade ultime de la dégradation de certaines étoiles (cf. EI, n° 14, p. 4). « Avalant » étoiles et gaz passant à proximité, leur masse s'accroîtrait jusqu'à atteindre cent millions de fois celle du Soleil. Il en résulterait dans leur voisinage immédiat un champ de gravité si intense que même les rayons lumineux ne pourraient s'en échapper (d'où leur nom de trous noirs). Les lois physiques s'appliquant à la matière qui se trouve à l'intérieur d'un trou noir nous sont encore inconnues.

Peut-on localement annuler un champ de pesanteur ?

Contrairement à ce qu'on observe avec l'électricité et le magnétisme, il n'existe aucune particule insensible au champ de gravitation. C'est pourquoi on dit que la gravitation est une interaction universelle.

Au moins peut-on annuler ses effets ? Au repos (entendons, par là, à la surface d'un astre, par exemple) c'est impossible. Tout au plus peut-on simuler partiellement l'absence de certains effets en usant de subterfuges (adoption d'une position couchée prolongée par les candidats cosmonautes, travail en milieu aquatique, utilisation d'un système sustentateur pour soutenir un cosmonaute ou une expérience, etc.). Ces techniques de simulation seront décrites dans le numéro 29 de notre revue.

Par contre, il est possible d'obtenir un état d'impesanteur (les objets n'ont alors plus de poids apparent) en soumettant les corps concernés à une chute libre sans contrainte d'aucune sorte (résistance de l'air, etc.). Cet état d'impesanteur s'observe naturellement, de façon durable, à bord des stations spatiales en orbite autour de la Terre mais plus brièvement de diverses manières (tours d'impesanteur, fusées-sondes, avions) : ces possibilités seront examinées en détail dans le n° 29 d'Espace Information.

De façon artificielle, peut-on créer en une région de l'espace un champ d'accélération plus intense que celui qui existe naturellement ?

La réponse est oui (dans certaines conditions); donnons-en deux exemples.

A la surface de la Terre, il est possible de créer, dans un but expérimental, des accélérations bien supérieures à celles existant normalement du fait de l'attraction terrestre naturelle. Pour cela on peut utiliser des installations spéciales appelées *centrifugeuses*. Ce sont des enceintes fixées à l'extrémité d'un long bras et mises en rotation plus ou moins rapide dans un plan horizontal : en raison du mouvement circulaire, dans le repère tournant de la centrifugeuse apparaissent des forces (centrifuges) d'inertie d'entraînement dont le module peut atteindre plusieurs fois celui de l'attraction terrestre.

Mais l'accélération associée à ces forces ayant une direction (contenue dans un plan horizontal) différente de celle de la pesanteur (verticale), il est impossible d'utiliser la première pour compenser la seconde, autrement dit de parvenir par ce biais à l'impesanteur.

N'hésitons donc pas à rappeler que, contrairement à ce qui est parfois écrit ici ou là, une centrifugeuse ne peut en aucune

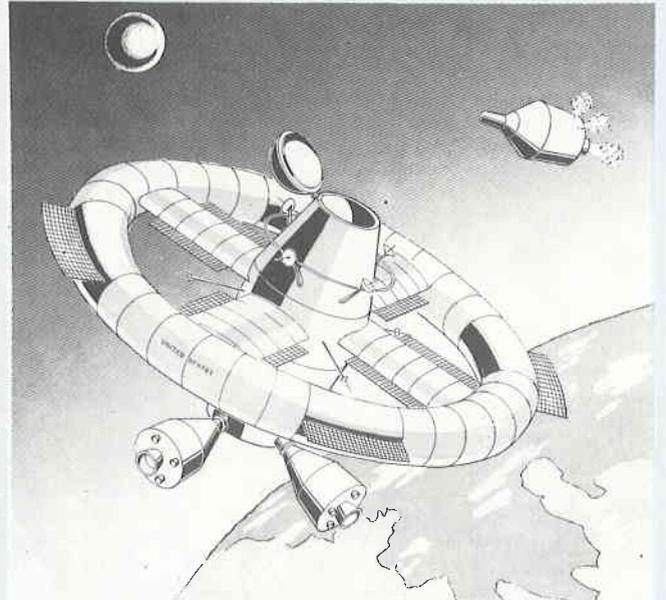
manière servir à supprimer les effets du champ de pesanteur terrestre, c'est-à-dire à simuler l'impesanteur.

De telles installations (où l'on peut atteindre plusieurs dizaines de fois l'accélération de la pesanteur) servent à l'entraînement des pilotes d'essais et des cosmonautes (EI, n° 15, p. 5), ces derniers s'habituant ainsi à supporter les accélérations qu'ils subiront au décollage de leur fusée et les décélérations lors du retour sur Terre. Au cours des opérations de lancement (et de rentrée) l'accélération (décélération) peut atteindre ordinairement de 3 à 5 g mais l'Homme est capable de supporter des accélérations supérieures (cf. EI, n° 7, p. 8) d'autant plus élevées qu'elles s'exerceront moins longtemps.

(Dans un tout autre domaine, signalons aussi l'existence d'ultracentrifugeuses, utilisées par exemple pour la séparation moléculaire, qui permettent de créer des accélérations 300 ou 400 000 fois plus intenses que celle de la pesanteur !)

Le second exemple concerne les stations spatiales en orbite autour de la Terre. A l'intérieur, on constate un état de quasi-impesanteur dont les effets sur l'organisme humain ne sont pas négligeables (cf. EI, n° 15, p. 4).

Souhaitant modifier cet état de fait, on a songé pendant un temps à créer une pesanteur artificielle en mettant la station en rotation sur elle-même ce qui aurait suffi à restituer plus ou moins partiellement un facteur naturel de l'environnement naturel de l'Homme sur Terre. Mais c'était compter sans les troubles provoqués par la force de Coriolis (5).



(Un exemple de station spatiale telle qu'on les concevait dans les années soixante. On envisageait alors de restituer une fraction de la pesanteur terrestre en faisant pivoter la station autour de l'axe central (Document McLaughlin).

Aussi aujourd'hui semble-t-on plutôt s'orienter vers un concept de station composée de deux modules (en anglais : *tethered satellites*, satellites attachés), assez éloignés l'un de l'autre mais reliés entre eux ce qui donnerait à l'ensemble la forme d'un haltère.

Ce module serait stabilisé par gradient de gravité, ce qui signifie que son axe serait en permanence dirigé vers le centre de la Terre. Autrement dit, au terme d'une révolution autour de notre globe, la station aurait aussi effectué un tour sur elle-même. Et c'est cette lente rotation qui devrait permettre de créer une pesanteur réduite (de l'ordre de 0,1 à 0,2 g), suffisante pour éliminer certains effets nocifs propres à l'impesanteur, mais sans qu'apparaisse la force de Coriolis (puisque la station demeure immobile par rapport au repère tournant).

(5) La force de Coriolis se manifeste sur tout objet d'un référentiel tournant lorsque cet objet est lui-même en mouvement par rapport à ce référentiel.

(suite de la page 13)

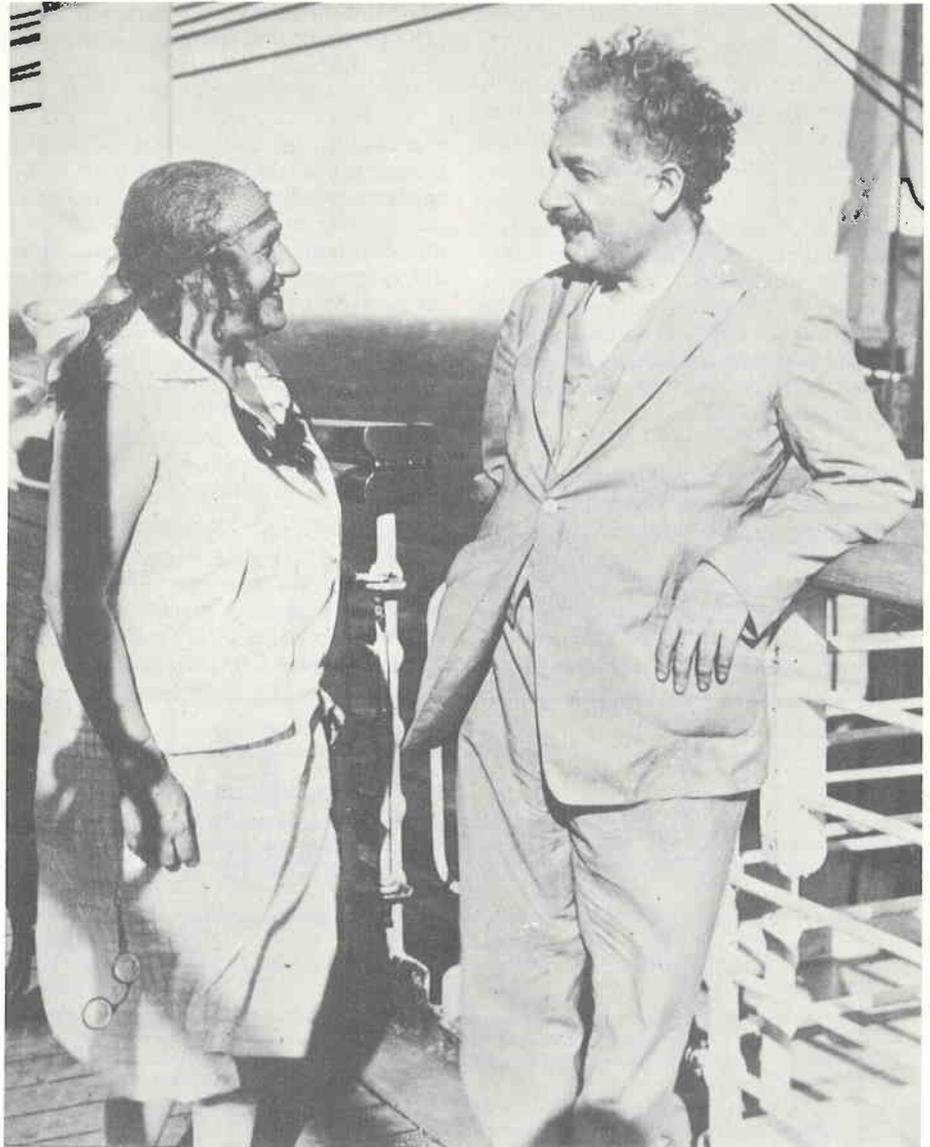
tème galiléen au moyen de rayons lumineux, Einstein montre en effet que deux événements distants l'un de l'autre, jugés comme simultanés dans un système galiléen, ne le sont plus nécessairement dans un autre système galiléen en mouvement de translation uniforme par rapport au premier.

Les postulats d'Einstein entraînent donc une modification profonde de notre intelligence des phénomènes électromagnétiques d'une part, des fondements de la mécanique newtonienne d'autre part. Non seulement il n'y a plus d'éther immobile susceptible de définir un système de référence privilégié au repos absolu, mais l'espace et le temps absolus de l'ancienne mécanique doivent quitter la scène pour laisser la place à un cadre absolu unique, *l'espace-temps*.

Il faut toutefois noter que le concept d'espace-temps ne fut pas forgé par le fondateur de la relativité restreinte, mais par le mathématicien Hermann Minkowski (en 1908), ancien professeur d'A. Einstein. Selon la conception de Minkowski, l'univers physique doit être considéré comme un tout quadridimensionnel dans lequel une particule est représentée non plus comme un point en mouvement dans l'espace absolu, mais comme une ligne d'univers totalisant l'histoire de cette particule. Les lois de transformation qui permettent de passer d'un système galiléen à un autre reçoivent alors une interprétation simple liée à la géométrie de l'espace-temps. Après quelques réticences initiales, Einstein finit par accepter le nouveau formalisme. Celui-ci s'est avéré d'une fécondité exemplaire dans toutes les branches de la physique théorique (électromagnétisme et théorie des particules notamment), et a constitué l'outil géométrique de base dans l'édification de la **relativité générale**.

L'abandon de la cinématique newtonienne, fondée sur les notions d'espace et de temps absolus, indépendants l'un de l'autre, entraînait *ipso facto* la nécessité de réviser les lois fondamentales de la dynamique. Dans sa première publication sur la relativité restreinte, Einstein montre que la relation fondamentale de la dynamique qui généralise la loi $\vec{F} = m\vec{a}$ de Newton s'écrit :

$$F = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$$



Einstein et son épouse (Document B.N.).

Dans cette formule, la masse m de la particule animée de la vitesse \vec{v} varie (27) avec cette vitesse selon la relation $m = m_0 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, où m_0 est la masse

au repos. Trop faible pour être observée dans les phénomènes quotidiens (28), la variation de la masse avec la

(27) Pour éviter toute confusion dans l'esprit des étudiants, l'usage actuel dans l'enseignement secondaire conduit à considérer la **masse comme un invariant** et à faire intervenir, dans les problèmes relativistes, le facteur $\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$.

(28) La relativité restreinte n'a pas pour autant éliminé la dynamique newtonienne. Cette dernière reste pleinement satisfaisante dans un nombre immense de problèmes, tant que la vitesse reste petite devant c (avions, fusées, satellites, etc.).

Il est cependant aberrant d'affirmer comme on le fait souvent que la relativité intervient uniquement dans le domaine des vitesses voisines de c : les actions électrodynamiques bien connues de la physique pré-einsteinienne (champs magnétiques créés par des courants, phénomènes d'induction, etc.) sont des effets essentiellement relativistes et ne peuvent être compris qu'à partir des formules de transformation de la relativité.

vitesse se vérifie aisément dans les collisions de particules dont la vitesse est proche de celle de la lumière, telles qu'on les obtient dans les accélérateurs.

Dès 1905 également, Einstein établit grâce aux formules de la relativité restreinte qu'un atome émettant une énergie ΔE sous forme de radiation lumineuse voit sa masse décroître de la quantité $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$. Un peu plus tard, il

extrapole la relation précédente à toutes les formes d'énergie et introduit la célèbre formule $E = mc^2$. Cette **équivalence masse-énergie** est bien vérifiée par les expériences usuelles de matérialisation de paires d'électrons négatifs et d'électrons positifs grâce à des rayonnements γ . Réciproquement des paires d'électrons négatifs et d'électons positifs peuvent s'annihiler en produisant

De la pesanteur à la gravitation

un rayonnement γ qui emporte une énergie égale à l'énergie totale des paires dématérialisées. Ainsi la matière et la lumière (et plus généralement le rayonnement électromagnétique) apparaissent comme deux formes d'énergie convertibles l'une en l'autre.

Dans les années qui suivent, Einstein s'efforce d'étendre le principe de relativité aux systèmes de référence accélérés. Cet effort de pensée est couronné par la publication en 1915 de sa **théorie de la relativité générale**, qui donne une solution entièrement nouvelle du problème de la gravitation.

Cette solution s'appuie sur l'**égalité entre masse inerte et masse grave** que la mécanique newtonienne admettait sans l'expliquer. Pour fixer les idées, considérons une particule de masse m (on l'appelle particule d'épreuve) dans le champ gravitationnel d'une masse sphérique M (la Terre par exemple).

L'attraction exercée par la masse M sur cette particule d'épreuve a pour intensité

$$F = \mathcal{G} \frac{Mm}{r^2}, \text{ d'après Newton. Dans cette}$$

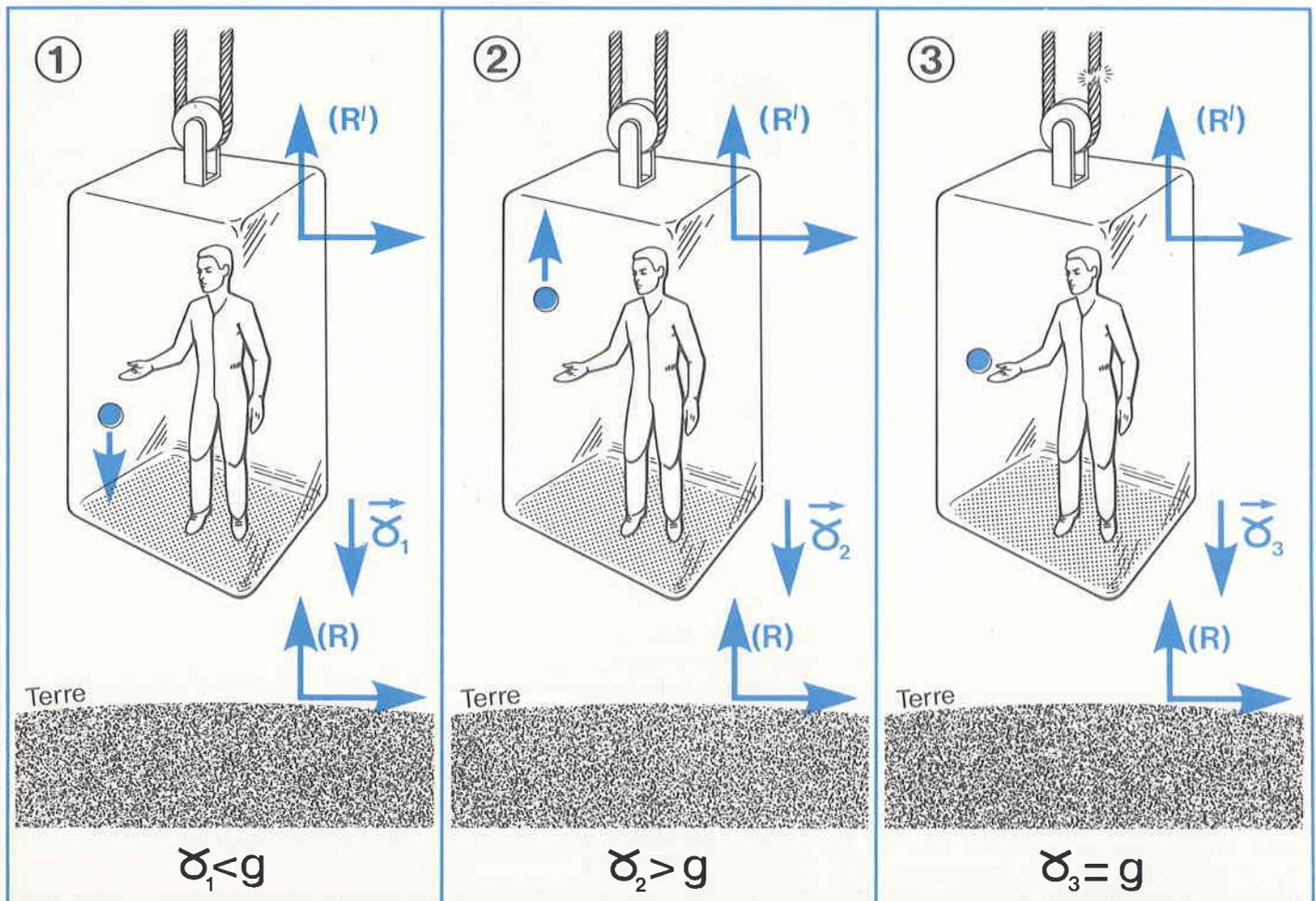
expression, la quantité m désigne la masse grave de la particule. Or, des expériences d'une très haute précision ont montré que cette quantité coïncide numériquement avec la masse inerte qui intervient dans la loi fondamentale de la dynamique. On écrira donc $F = my$. En rapprochant les deux expressions de F , on voit que l'accélération communiquée à la particule d'épreuve par la masse M est $\gamma = \mathcal{G} M/r^2$. Cette accélération est indépendante de la masse m du corps attiré. Quelle est l'explication de ce fait?

Pour Einstein, l'égalité de la masse inerte et de la masse grave doit être interprétée comme une **identité d'essence entre force d'inertie et force de gravitation**: identité d'essence signifie que localement les deux forces ont des

actions indiscernables (29), puisqu'elles communiquent toutes les deux une accélération indépendante de sa masse à n'importe quelle particule d'épreuve. La supposition que cette conception est justifiée est baptisée **principe d'équivalence** par Einstein. Il en résulte que le choix judicieux d'un système de référence accéléré permet de modifier et même d'annihiler les effets d'un champ de gravitation, tout au moins dans une région infiniment petite de l'espace. C'est ce que montre Einstein en raisonnant sur un ascenseur situé dans le champ de la Terre.

Si l'ascenseur est immobile par rapport à la Terre, une balle lâchée sans vitesse initiale tombe spontanément vers le plancher avec un mouvement dont l'accélération est égale à l'accélération g de la pesanteur.

(29) Insistons bien sur le **caractère local** de cette identité. Il n'en résulte nullement que les structures des deux champs de forces soient identiques dans une région étendue de l'espace ni que leurs causes soient les mêmes (voir plus loin).



On considère un expérimentateur à l'intérieur d'une cabine d'ascenseur, au voisinage de la Terre (par un procédé quelconque, ses pieds sont rendus solidaires du plancher).

L'expérience consiste à soumettre la cabine à un mouvement rectiligne uniformément accéléré vers le bas (par rapport à un repère terrestre R , supposé galiléen), à faire lâcher une balle à l'expérimentateur et à observer le mouvement de celle-ci (par rapport à un repère R' solide de la cabine). Selon la valeur de l'accélération, la balle se dirigera soit vers le sol (1), soit vers le plafond (2) ou restera immobile dans la cabine (3).

Ce dernier cas, qui correspond à un mouvement de chute libre de la cabine (dans R) est à l'origine de l'état d'impesanteur. L'expérimentateur n'éprouve aucune sensation de poids et il « flotterait » dans la cabine si ses pieds n'étaient pas fixés au plancher (Document E1 — Boltana/Reilles).

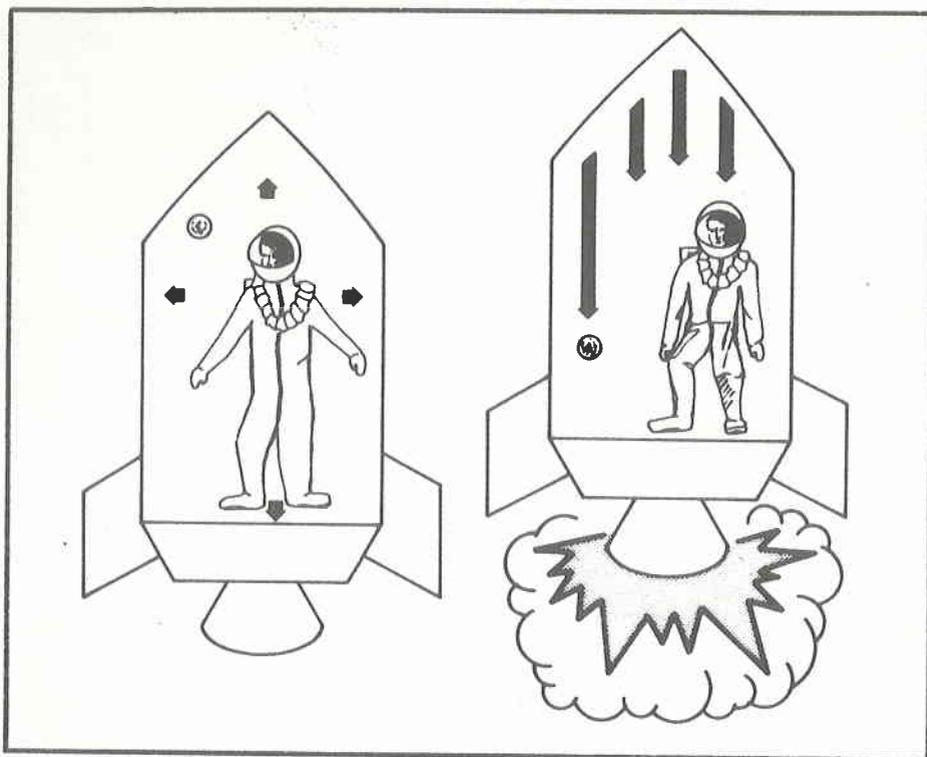
Un observateur placé à l'intérieur de la cage supposée sans fenêtre ne pourra dire si la balle tombe à cause d'un champ de gravitation créé par une masse à proximité, ou si elle tombe parce que la cage est animée d'un mouvement uniformément accéléré par rapport à un système galiléen supposé très éloigné de toute masse.

Si maintenant on coupe le câble de l'ascenseur, celui-ci tombe en chute libre : dès lors, une balle lâchée sans vitesse initiale dans cet ascenseur reste au repos par rapport au système de référence constitué par la cage. L'observateur lui-même n'éprouve aucune sensation de poids : il se trouve dans l'état d'impesanteur popularisé par les expériences astronautes.

De nouveau cet observateur a le choix entre deux interprétations : ou bien il considère que son système de référence est en chute libre dans le champ gravitationnel de la Terre, ou bien il considère que l'accélération de son système de référence a cessé et que ce système est devenu galiléen. De même que dans le cas précédent, ces deux interprétations sont indiscernables par des expériences locales, confinées à l'intérieur de la cage.

Il ressort de cette analyse que dans un système de référence en chute libre dans un champ de gravitation, la loi d'inertie est vérifiée, tout au moins dans une région suffisamment petite de l'espace. Cette constatation amène Einstein à postuler la validité locale de la relativité restreinte pour de tels systèmes. Tous les systèmes de référence en chute libre en différents endroits du champ peuvent donc être tenus pour équivalents dans la description des phénomènes physiques locaux. Toutefois, il y a maintenant une différence fondamentale avec la situation qui se présentait en relativité restreinte, différence qui va justifier pourquoi nous insistons tant sur le caractère local de l'identité entre forces d'inertie et forces de gravitation. L'accélération \vec{g} de la pesanteur due à la masse m n'est en effet pas la même en tout point de l'espace : le vecteur \vec{g} varie en intensité et direction lorsqu'on passe du point P au point P' (cf. figure ci-contre).

Les systèmes de référence en chute libre en P et en P' ne sont donc pas en mouvement de translation rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre. Il en résulte que les formules mathématiques permettant de comparer des mesures d'espace et de temps dans les deux systèmes ne peuvent pas être celles de la relativité restreinte. Valable localement, la relativité restreinte ne peut être étendue à une région finie de l'espace où règne un champ de gravitation.



Gravitation, accélération et impesanteur.

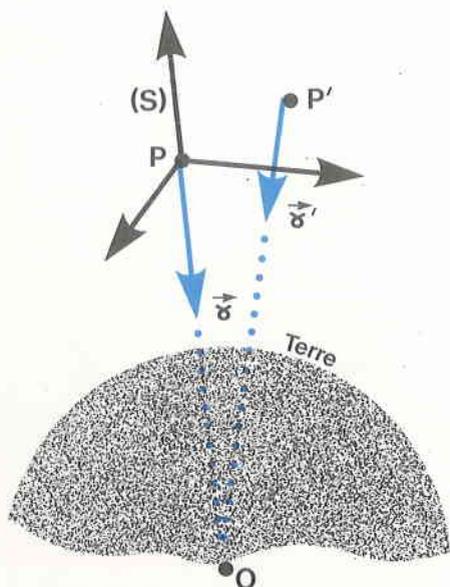
Soit un astronaute à l'intérieur d'un vaisseau spatial suffisamment éloigné de toute masse pour pouvoir être considéré dans un champ de gravité nulle (à gauche). Abandonnée à elle-même, une balle « flotterait » comme elle le faisait dans la cabine d'ascenseur dont le câble s'était rompu (voir page précédente).

On obtiendrait une situation analogue si le véhicule spatial était en chute libre dans un champ gravitationnel.

Il n'existe aucune différence physique entre un mouvement de chute libre et l'absence complète de champ gravitationnel.

A présent, l'astronaute met à feu les moteurs de son véhicule (à droite) de façon à créer (par rapport à un repère galiléen) une accélération constante égale à celle de la pesanteur terrestre. Il voit la balle tomber aussitôt vers le sol, exactement comme elle le ferait si le véhicule était immobilisé à la surface terrestre.

A l'intérieur de son véhicule, l'astronaute est incapable de distinguer s'il est immobile dans un champ gravitationnel ou si son véhicule est en mouvement uniformément accéléré (par rapport à un repère galiléen) (Document NASA).



Dans un système de référence (S) en chute libre au point P, la loi de l'inertie est vérifiée en toute rigueur uniquement dans un voisinage de P d'extension spatiale infiniment petite.

En un point P' situé à une distance finie de P, le mouvement de chute libre ne compense pas l'influence du champ de gravitation dû à la masse centrale M (la Terre, par exemple). En effet les vecteurs accélérations en P et en P' ne sont pas parallèles puisqu'ils convergent vers le centre O de la masse M et ils n'ont pas la même intensité si P' n'est pas à la même altitude que P.

Cet argument montre que dans une région étendue de l'espace les forces de gravitation et les forces d'inertie ne peuvent être considérées comme indiscernables. Einstein en a déduit qu'il faut abandonner la relativité restreinte pour décrire les propriétés globales de l'espace-temps en présence de champ gravitationnel (Document EI — Boltana/Reilles).

Aux yeux d'Einstein, cette constatation est inéluctable et mène au corollaire suivant : en présence d'un champ gravitationnel, l'espace-temps possède une structure géométrique plus complexe que celle de Minkowski. Selon la conception de ce dernier, la géométrie universelle était étroitement apparentée à la géométrie euclidienne usuelle (celle d'une feuille de papier plane par exemple) : pour cette raison, on dit souvent que l'espace-temps de Minkowski est *plat*. Or, la généralisation la plus naturelle d'un espace euclidien est un *espace courbe* (une surface sphérique en est un exemple). Une induction hardie fondée sur le principe d'équivalence conduit ainsi Einstein à postuler que *l'action gravitationnelle exercée par une masse sur une autre ne résulte pas d'une force d'attraction, comme le pensait Newton (30), mais d'une courbure de l'espace-temps au voisinage et à l'intérieur de ces masses.*

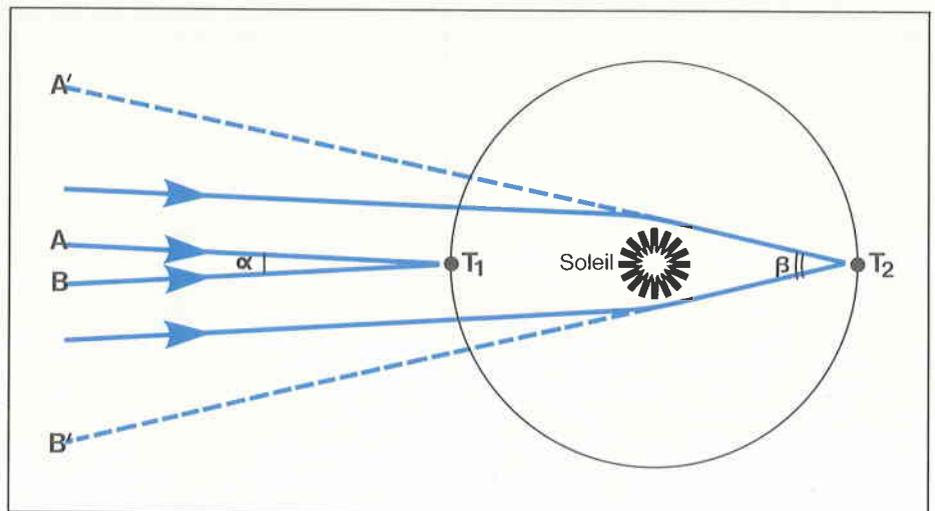
En réalité l'énoncé précédent est encore trop limité et doit être généralisé. En effet, nous avons vu que d'après la relativité restreinte, il y a équivalence entre la masse et l'énergie. Par conséquent toutes les distributions d'énergie (non seulement l'énergie de masse, mais aussi la lumière, le champ électromagnétique pur, les champs de force à l'intérieur des noyaux atomiques, etc.) doivent contribuer à courber l'espace-temps. Inversement, si toutes les formes d'énergie contribuent au champ gravitationnel, elles doivent aussi interagir toutes avec un champ donné. La théorie einsteinienne prévoit donc qu'un rayon lumineux sera dévié par un champ gravitationnel, celui du Soleil par exemple. Cette prédiction est effectivement confirmée par les observations avec une précision de l'ordre de 1%. Cette déviation peut également créer des *mirages gravitationnels* (31). Le calcul montre qu'un quasar unique pourrait donner naissance à plusieurs images si sa lumière traversait une galaxie située entre ce quasar et nous.

Une représentation simple (qu'il ne faut évidemment pas prendre à la lettre) permettra au lecteur de se convaincre qu'une modification de la structure géométrique de l'espace-temps puisse rendre compte des phénomènes gravitationnels.

Imaginons une membrane extensible tendue sur un cerceau horizontal. A condition de négliger la déformation

(30) N'oublions pas que Newton et ses contemporains étaient très troublés par l'idée qu'une force puisse se transmettre à distance dans un espace vide.

(31) Voir l'article intitulé *Un mirage gravitationnel*, par F. Chaffe, Pour la science, n° 39, janvier 1981, ainsi que *Les mirages gravitationnels*, Les cahiers Clairaut, n° 18, automne 1982, pp. 3-10.



D'après la relativité générale, un rayon lumineux qui passe près du Soleil subit une légère déflexion due à la courbure de l'espace-temps par la masse du Soleil.

Pour vérifier cet effet relativiste, on compare des clichés de la même partie du ciel voisine de l'écliptique, effectués à six mois d'intervalle avec le même instrument.

Lorsque la Terre est dans la position T₁, sur son orbite, deux étoiles sont vues respectivement en A et B. Six mois plus tard, alors que la Terre est en T₂, les mêmes étoiles sont vues en A' et B'.

La différence des écartements angulaires $\beta - \alpha$ que l'on trouve par l'observation photographique est en bon accord avec la prévision de la relativité générale.

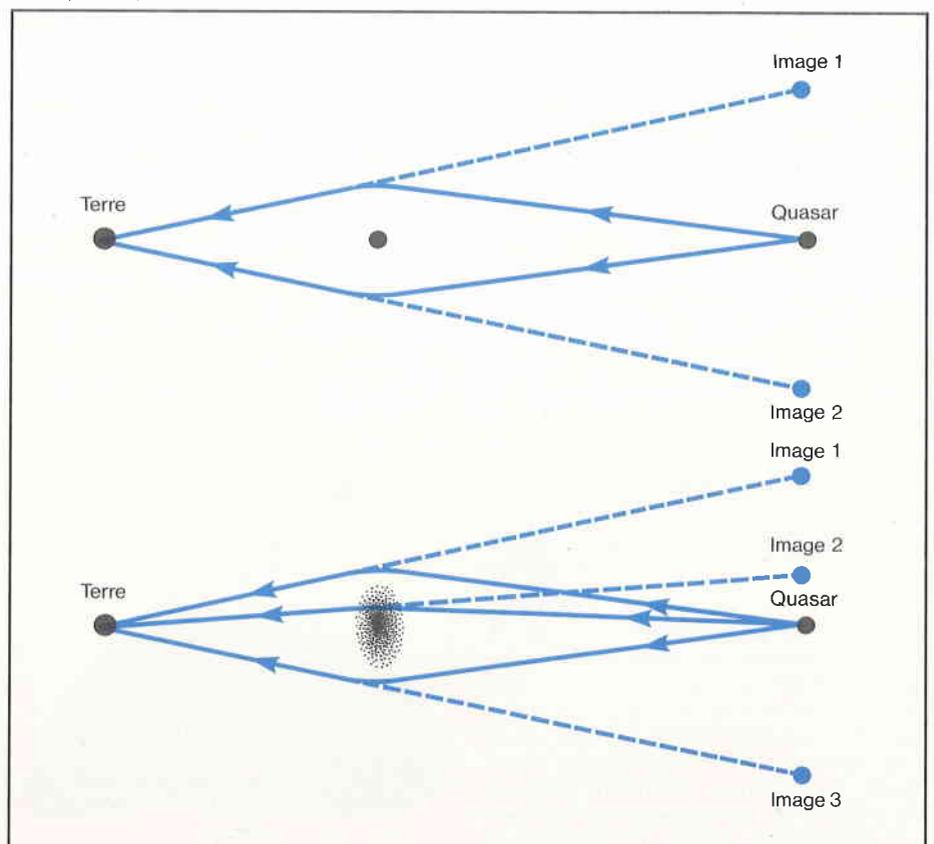
Des quasars ont également permis de vérifier l'effet de déflexion des ondes radio par le Soleil (Document E1 — Boltana/Reilles).

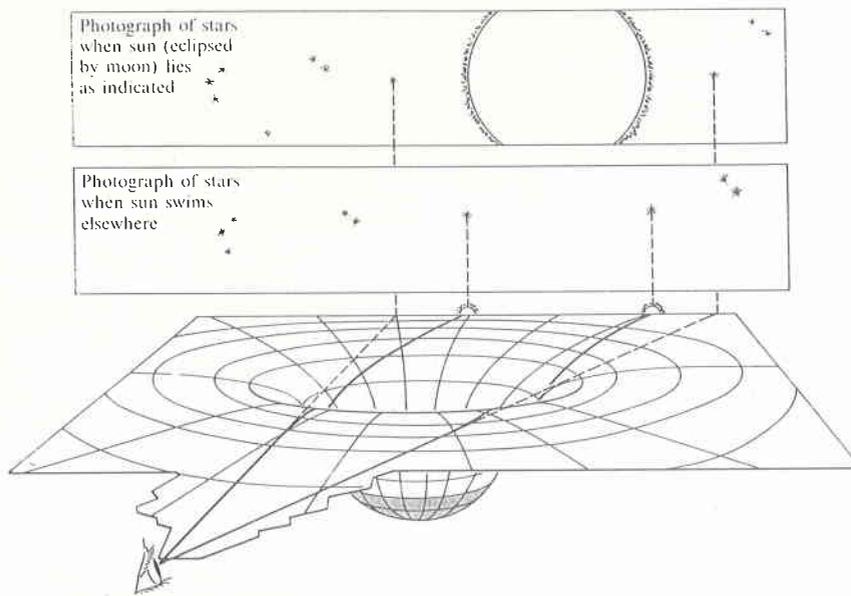
Les masses quasi ponctuelles ou étendues se comportent comme des lentilles gravitationnelles.

Une masse quasi ponctuelle opaque (galaxie très dense ou très absorbante, éventuellement trou noir) peut donner naissance à deux images pour un quasar unique.

Une masse étendue (galaxie elliptique, par exemple) peut produire trois images d'un même quasar lorsque l'alignement est presque parfait.

Le nombre, l'aspect et la brillance des images dépendent fortement de la précision de l'alignement et de la distribution de matière à l'intérieur de la masse déflexrice (Document E1 — Boltana/Reilles).

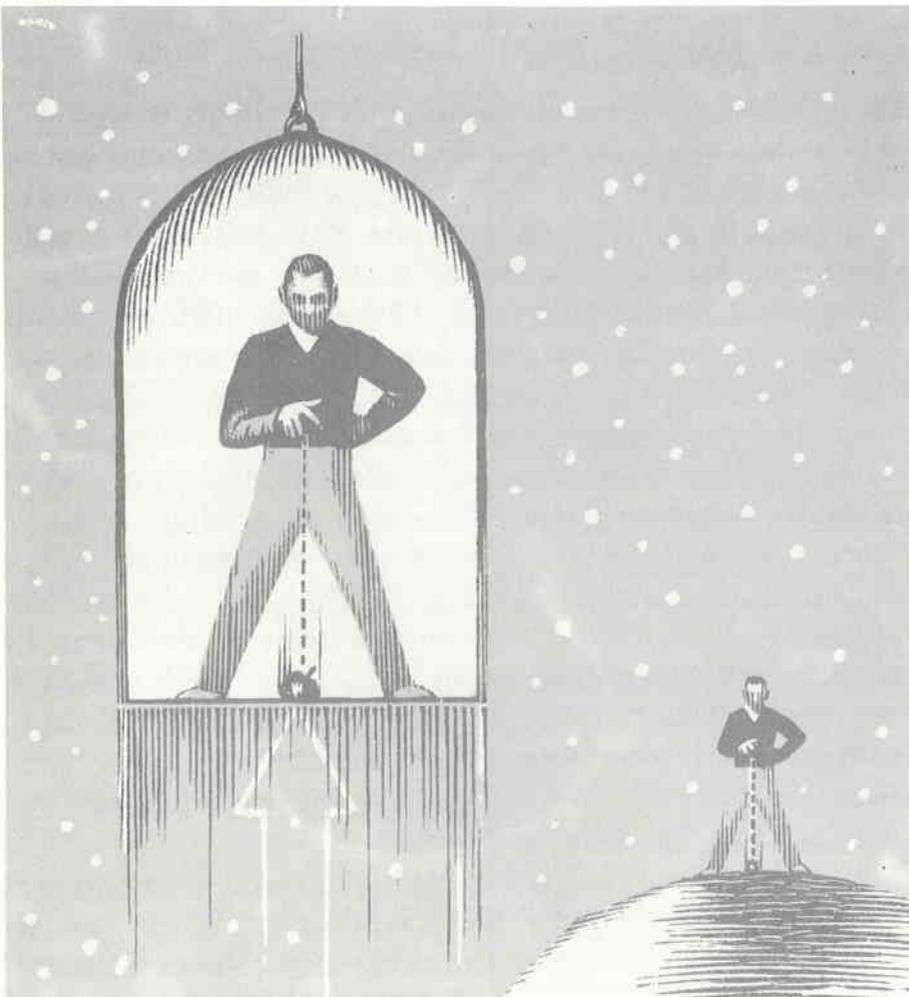




Autre représentation de la déviation de la lumière par le Soleil imputable à la courbure de l'espace-temps au voisinage du Soleil (Document extrait de Gravitation, par C. Misner, K. Thorne et J. Wheeler, W. H. Freeman and Company, 1973).

Une même expérience réalisée, d'une part, à la surface de la Terre (on rapporte le mouvement de la pomme qui tombe à un repère terrestre présumé galiléen), d'autre part, à l'intérieur d'un ascenseur animé d'une accélération constante (mesurée dans un repère galiléen), égale à celle de la pesanteur terrestre, conduira à des résultats identiques.

Le passager d'un tel ascenseur croit se trouver dans un champ de gravitation identique à celui de la Terre (Dessin extrait de La relativité pour tous, par M. Gardner, Dunod, 1969, avec l'aimable autorisation de MacMillan Publishing Co., Inc., New York).



due à la pesanteur, la membrane peut être considérée comme plane. Supposons également que l'on puisse faire rouler une petite bille sans frottement sur cette membrane. Lancée sur la membrane avec une certaine vitesse, la bille est alors animée d'un mouvement rectiligne uniforme. Dans l'espace plat (à deux dimensions) constitué par la membrane, le principe d'inertie usuel est par conséquent vérifié. Nous avons un exemple d'espace dépourvu de champ gravitationnel.

Supposons maintenant qu'on place au centre de la membrane une boule très massive. Alors la membrane prend la forme d'une cuvette incurvée vers le bas: la membrane est devenue un espace courbe. Une bille lâchée sans vitesse initiale à proximité de la boule massive se met en mouvement et vient tomber sur cette boule. Ce mouvement spontané n'est pas dû à une mystérieuse attraction de la boule sur la petite bille (l'attraction newtonienne entre les deux corps peut être négligée ici) mais traduit le fait que la membrane est un espace courbe. Un tel espace est doué de propriétés gravitationnelles.

Revenons à l'espace-temps de la relativité générale. Tout ce qui vient d'être dit devrait maintenant permettre à nos lecteurs de concevoir sans peine que le mouvement accéléré d'une particule d'épreuve dans le champ gravitationnel est une généralisation simple du principe d'inertie. Que postule en effet ce dernier? Une particule d'épreuve qui n'est soumise à aucune force se déplace en ligne droite avec une vitesse constante. Or, quelle est la propriété fondamentale d'une droite? La géométrie élémentaire répond: celle d'être la ligne la plus courte entre deux points A et B de l'espace. Eh bien, ce concept de ligne la plus courte entre deux points se généralise aux espaces courbes. Sur une sphère par exemple, la ligne la plus courte entre deux points A et B est l'arc de grand cercle passant par ces points. De telles lignes qui jouent le rôle des droites en géométrie euclidienne portent le nom de géodésiques de l'espace courbe considéré.

L'extension naturelle du principe de l'inertie consistera donc à postuler que dans un champ gravitationnel, la ligne d'univers d'une particule d'épreuve (rappelons qu'on appelle ainsi la courbe qui représente l'histoire de la particule dans l'espace-temps) est une géodésique de l'espace-temps courbe. Ainsi, inertie et gravitation constituent deux phénomènes intégrés dans une description géométrique unifiée qui rend compte de leur identité locale. A lui seul, cet aspect constitue un progrès décisif par rapport à l'ancienne théorie.

Une fois élaboré le cadre conceptuel de la nouvelle théorie, il reste à expliciter la liaison précise entre la structure géométrique de l'espace-temps et le contenu énergétique de l'univers. Après plusieurs années de tâtonnements durant lesquelles il a heureusement bénéficié de la collaboration du mathématicien Grossmann, Einstein découvre en 1915 les fameuses équations qui portent son nom.

Dès sa naissance, la nouvelle théorie suscite beaucoup de critiques et de débats mais, très vite, les équations

einsteiniennes de la gravitation s'avèrent un outil de prédiction et de recherche dont on ne peut se passer. Elles permettent tout d'abord de déterminer rigoureusement le champ d'un corps sphérique comme le Soleil et de corriger la loi de Newton. La fameuse avance du périhélie de Mercure d'une quarantaine de secondes d'arc par siècle, qui intriguait les astronomes de la fin du siècle dernier, est correctement expliquée sans introduire d'hypothèse *ad hoc* (32).

La déviation d'un rayon lumineux lors de son passage au voisinage du

Soleil est mesurée lors d'une éclipse totale de Soleil en 1919 et correspond assez bien au calcul théorique.

La relativité générale prévoit également un décalage vers le rouge de la lumière émise sur le Soleil. Là encore les mesures s'accordent assez bien avec le résultat théorique.

Aujourd'hui ces trois effets, auxquels est venu s'ajouter un quatrième, constituent ce qu'on appelle les *tests classiques de la relativité générale*. Les mesures effectuées pendant les vingt dernières années ont confirmé la théorie avec une précision relative qui varie de 10 % à 1 % selon les effets et les techniques mises en jeu. Il faut souligner que les *vérifications les plus précises* (actuelles aussi bien que futures) *sont largement tributaires des expériences spatiales*.

Tout d'abord, le mouvement des sondes permet de mieux connaître les paramètres fondamentaux du système solaire (masses du Soleil et des planètes, distance Terre-Soleil, etc.) et, par conséquent, de mieux cerner les désaccords entre mécanique newtonienne et mécanique relativiste. En outre des expériences ayant un but spécifique de vérification de la relativité peuvent être réalisées grâce à des sondes ou à des satellites artificiels. Il est en effet facile de concevoir que la déviation des rayons lumineux ou le décalage des longueurs d'onde deviennent relativement faciles à observer à l'échelle du système solaire (voire du système Terre-satellite) alors qu'ils resteraient bien au-dessous des barres d'erreur à la surface de la Terre.

Il ne faudrait toutefois pas imaginer que l'apport de la relativité générale se borne à d'infimes modifications de la théorie newtonienne de la gravitation. En réalité, bien souvent sous l'impulsion d'Einstein lui-même, cette théorie a ouvert de nouveaux champs d'exploration, insoupçonnés de la physique antérieure :

1. Dès 1917, Einstein montre qu'une modification des équations de la gravitation parfaitement compatible avec les principes de base (adjonction d'une constante cosmologique) permet d'élaborer un modèle statique de l'univers

Quelques références bibliographiques

- **Réf. 1 : La science moderne**, Histoire générale des sciences, tome 2, Presses universitaires de France, Paris, 1958.
 - **Réf. 2 : Les origines de la physique moderne**, par B. Cohen, Petite bibliothèque Payot, Paris, 1960.
 - **Réf. 3 : Newton et la découverte de la gravitation universelle**, par B. Cohen, Pour la science, mai 1981, pp. 101-110.
 - **Réf. 4 : La genèse des lois de Kepler**, par P. Russo, Astronomie, janvier 1973, pp. 1-17.
 - **Le cours de physique de Feynman**, Mécanique 1, Inter-Éditions, Paris, 1979.
 - **Cours de physique de Berkeley**, volume 1 : mécanique (en particulier le chapitre 3 : *Invariance galiléenne*, pp. 54-91), Librairie A. Colin, 1972.
 - **Dynamique**, par H. Gié, Éditions J.-B. Baillière, 1981.
 - **Encyclopaedia Universalis**, voir les articles : Aristote, Copernic, Einstein, Galilée, gravitation universelle, Kepler, mécanique céleste, Newton, relativité, etc.
 - **La révolution astronomique**, par A. Koyré, Hermann, 1961.
 - **Subtle is the Lord...** (The Science and the Life of A. Einstein), par A. Pais, Oxford University Press, Oxford, 1982. L'ouvrage le plus complet et le plus clair sur la vie et l'œuvre d'Einstein.
 - **Histoire du principe de relativité**, par M.-A. Tonnelat, Nouvelle bibliothèque scientifique, Flammarion, Paris, 1971.
 - **Les somnambules**, par A. Koestler, Calmann-Lévy, 1960 (livre de poche n° 2200).
 - **L'astronomie et son histoire**, par J.-R. Roy, Presses de l'université du Québec/Masson, 1982.
 - **Méthodes de l'astrophysique**, par L. Gouguenheim, collection Liaisons scientifiques, Hachette/CNRS, voir en particulier le chapitre II intitulé *La gravitation universelle*, pp. 23-48.
 - **M. Tompkins au pays des merveilles**, par G. Gamow, Dunod, 1965.
 - **Un, deux, trois... l'infini**, par G. Gamow, Dunod, 1963.
 - **Errants et errances** (Notes pour tenter de comprendre l'histoire de la découverte de l'attraction universelle), Les cahiers Clairaut, n° 19, hiver 1982, p. 19 et n° 20, printemps 1983, p. 7.
 - En bandes dessinées, **Les aventures d'Anselme Lanturlu**, par J.-P. Petit, Éditions Belin.
- Parmi les titres en rapport avec les thèmes abordés dans cet article : *Tout est relatif* (1981), *Le trou noir* (1981), *Si on volait* (1980) et *Le géométricon* (1980).

(32) L'explication de l'avance du périhélie de Mercure fut considérée dans les années 20 comme le triomphe le plus éclatant de la relativité générale.

Aujourd'hui, la valeur de ce test paraît moins forte à cause de l'incertitude sur l'aplatissement du globe solaire. De nouvelles mesures sont projetées par la NASA, avec la sonde *Solar Probe*.

(33) Nous dirions aujourd'hui un gaz de galaxies.

considéré comme un gaz d'étoiles (33), de densité uniforme et constante. Bientôt plusieurs mathématiciens s'aperçoivent que des modèles d'univers non statiques sont également solution des équations d'Einstein, sans qu'il soit nécessaire d'introduire une constante cosmologique. Avec la découverte de l'expansion de l'univers par Hubble et Humason en 1929, ces modèles deviennent indispensables pour interpréter les observations des objets extragalacti-

ques. De spéculation mathématique précédant l'observation, la cosmologie relativiste passe au rang de cadre de pensée nécessaire pour une physique élargie, intégrant les aspects évolutifs de l'univers dans son ensemble.

Ce rôle est aujourd'hui plus vivant que jamais : la théorie du *Big Bang*, la découverte du rayonnement thermique cosmologique, la cosmogénèse des particules élémentaires, la formation des

galaxies, etc., constituent autant de problèmes ou d'observations qui s'inscrivent d'une manière cohérente et naturelle dans le paradigme relativiste.

2. En 1916, Einstein découvre qu'en première approximation, les équations de la gravitation présentent de profondes analogies avec les équations d'ondes vérifiées par les potentiels électromagnétiques. Il en déduit que des masses accélérées doivent engendrer

Quel avenir pour la gravitation théorique ?

On sait qu'un des grands rêves des physiciens est d'unifier dans une même explication les forces observées dans la nature : Newton a ainsi unifié la pesanteur terrestre et la force qui régit le mouvement des planètes en un schéma unique, la gravitation; Maxwell, au XIX^e siècle, a construit l'électromagnétisme à partir de deux disciplines jusque-là indépendantes, l'électricité et le magnétisme. Les physiciens du XX^e siècle ont organisé le monde autour de quatre grandes interactions : l'interaction gravitationnelle, objet de ce numéro d'Espace Information, l'interaction électromagnétique, dont la forme la plus élaborée, l'électrodynamique quantique, était mise au point à la fin des années 40 par R. Feynman, J. Schwinger et S. Tomonaga, l'interaction forte, responsable de la cohésion des noyaux atomiques, et l'interaction faible, responsable entre autres de la radioactivité bêta (transformation d'un noyau atomique avec émission d'un électron ou d'un positon).

Einstein a échoué dans ses efforts pour unifier gravitation et électromagnétisme. Mais depuis sa mort, en 1955, des progrès théoriques considérables ont préparé le terrain pour ce qui sera peut-être la grande unification, regroupant les autres interactions connues. Pour résumer ces progrès, disons que l'on représente aujourd'hui les interactions fondamentales par des théories ayant toutes une même forme mathématique générale, on les appelle en terme technique « théories de jauge non abélienne à symétrie locale ». Nous ne chercherons pas ici à présenter cette structure, le lecteur intéressé pourra se reporter à quelques articles cités en référence. En simplifiant à l'extrême, l'idée de base est de faire jouer un rôle fondamental aux symétries présentées par les interactions étudiées.

L'unification de deux des interactions fondamentales, l'interaction électromagnétique et l'interaction faible, a été obtenue dans ce cadre : il s'agit de la théorie électrofaible, dont la découverte a valu le prix Nobel de physique 1979 à Steven Weinberg, Abdus Salam et Sheldon Glashow. Elle est déjà confirmée par bon nombre d'expériences, en particulier la découverte des « courants neutres » en 1973 au CERN, et surtout – tout récemment – la découverte, au CERN encore, d'une particule qui présente les caractéristiques du boson faible chargé W prévu par la théorie de Weinberg, Salam et Glashow (voir Particules W : la fin d'une longue attente ?, La recherche, n° 143, avril 1983, p. 542).

Les physiciens ne s'arrêtent pas là : déjà ils essaient d'unifier la théorie électrofaible avec la théorie des interactions fortes, actuellement décrite par la chromodynamique quantique. Les modèles proposés portent le nom de théories grand-unifiées.

Une des conséquences de ces théories est que le proton, particule fondamentale pour la stabilité de la matière, serait lui-même instable, avec il est vrai une durée de vie de l'ordre de 10^{31} années, à comparer aux quelques 10^{10} années qui représentent l'âge de l'univers actuel dans le modèle du Big Bang; mais les expérimentateurs tentent déjà de relever le défi de la mesure de la durée de vie du

proton! Autre conséquence, ces théories permettraient une explication de la dissymétrie matière-antimatière dans l'univers.

La gravitation n'intervient pas dans les théories grand-unifiées. Il est vrai qu'en raison de son extrême faiblesse – l'intensité de l'interaction forte entre deux protons d'un même noyau est environ 10^{39} fois plus grande que l'intensité de l'interaction gravitationnelle – on peut la considérer comme négligeable dans la physique des particules élémentaires. Néanmoins, il existe des tentatives appelées théories de supergravité qui s'efforcent d'unifier les quatre interactions connues.

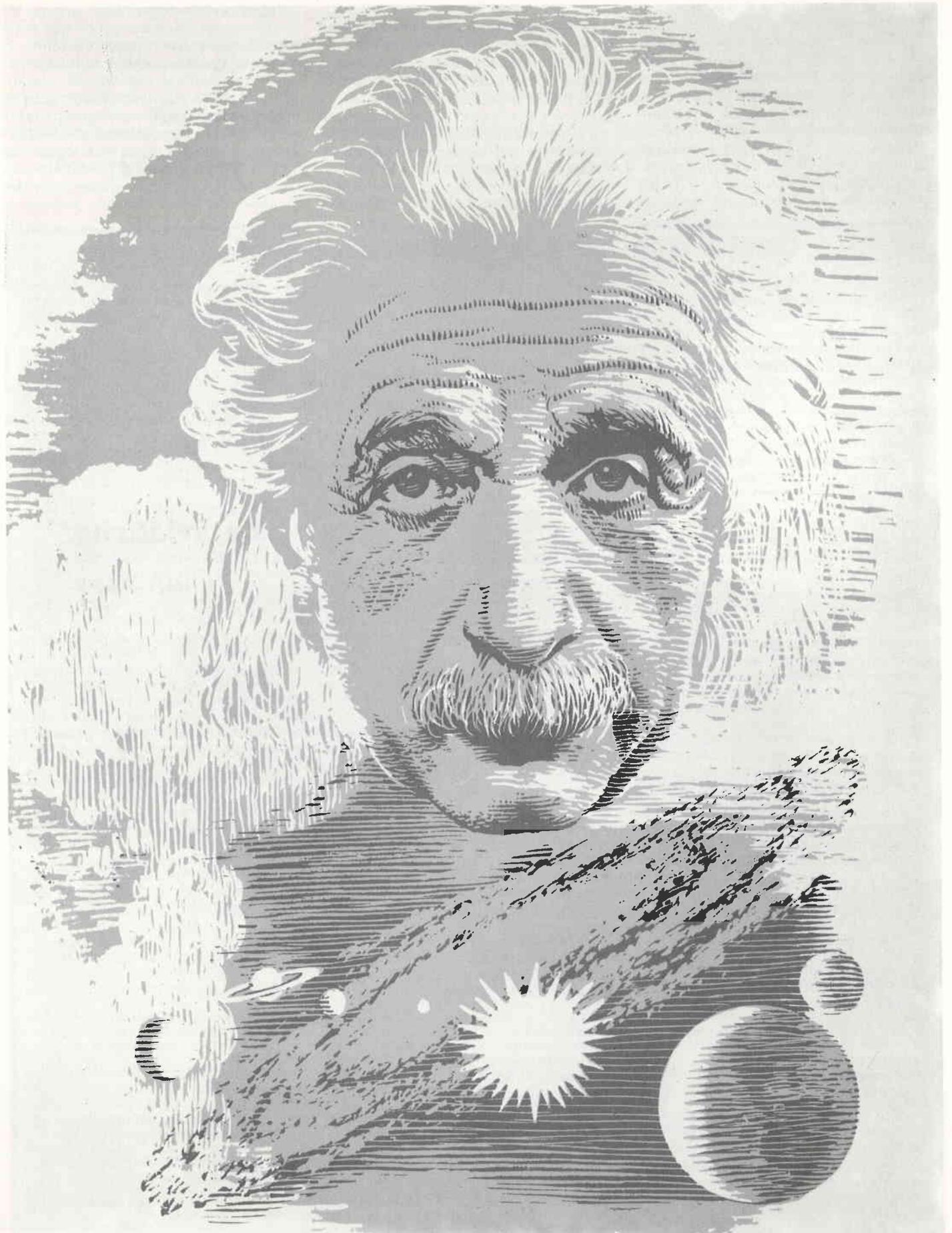
La symétrie à la base de la supergravité est particulièrement remarquable : elle établit un lien, donc une possibilité de transition, entre les deux grandes classes de particules élémentaires, jusqu'ici bien séparées : les bosons, particules de spin entier (tels les photons), et les fermions, particules de spin demi-entier (tels les protons, neutrons, électrons). Curieusement, cette symétrie introduit la force gravitationnelle à côté des autres forces. Toutefois de nombreux problèmes théoriques et physiques subsistent dans la supergravité : toutes les particules y ont une masse nulle, certaines particules connues ne s'insèrent pas dans son cadre... De plus, les tests expérimentaux sont extrêmement difficiles à concevoir : on peut penser à la recherche du graviton, déjà évoqué par ailleurs, ou d'une autre particule prédite par la supergravité, le gravitino. Mais si le modèle de la supergravité paraît aujourd'hui encore par certains points bien éloigné du monde physique, il faut savoir qu'il en était de même d'une des premières théories dites de « jauge à symétrie locale » appliquée aux particules élémentaires, celle élaborée en 1954 par Yang et Mills. C'est pourtant sur son modèle, enrichi par seulement quelques années de recherche, que sont édifiées actuellement les théories (électrofaible,...) dont nous avons évoqué les succès. Ainsi, nous ne devons pas désespérer de voir le vieux rêve des physiciens se réaliser dans un avenir pas trop éloigné...

*Michel Avignon,
CNES, Toulouse.*

Références :

- Une théorie unifiée des particules élémentaires et des interactions, Pour la science, n° 44, juin 1981.
- Les théories de jauge et les particules élémentaires, Pour la science, n° 34, août 1980.
- La supergravité et l'unification des lois de la physique, Pour la science, n° 6, avril 1978.

De la pesanteur à la gravitation



Einstein (Dessin extrait de La relativité pour tous, par M. Gardner, Dunod, 1969, avec l'aimable autorisation de MacMillan Publishing Co., Inc., New York).

des ondes gravitationnelles se propageant dans le vide avec la vitesse de la lumière, de la même manière que des charges électriques accélérées émettent des ondes électromagnétiques. Dans les deux années qui suivent, Einstein montre que le rayonnement gravitationnel émis par des masses animées de vitesses lentes est quadrupolaire loin des sources (alors que le rayonnement électromagnétique est dipolaire à l'infini). Il obtient en outre une formule permettant de calculer la puissance rayonnée.

En réalité, cette formule d'Einstein suppose que les masses émettant le rayonnement sont accélérées par des forces faibles non gravitationnelles. Lorsque les masses sont accélérées par leurs interactions gravitationnelles mutuelles, la puissance rayonnée à l'infini et l'effet de l'émission du rayonnement sur le mouvement de ces masses ne peuvent être déterminés que par des calculs extrêmement complexes tenant compte du caractère non linéaire des équations de la gravitation. Cependant des résultats tout à fait récents semblent établir la validité générale de la formule d'Einstein. Ces problèmes soulèvent actuellement un intérêt intense, en raison de la découverte en 1974 du pulsar binaire PSR 1913 + 16 (34). Le mouvement orbital de ce système binaire très serré est en effet tellement rapide que la perte d'énergie par rayonnement gravitationnel entraîne une diminution de période mesurable avec les moyens actuels. Cette diminution de période constitue une nouvelle vérification, très remarquable, de la relativité générale.

Parallèlement, la détection d'ondes gravitationnelles au moyen d'antennes appropriées (barres massives ou interféromètres ultra-précis) fait l'objet de nombreux programmes expérimentaux, plus ou moins avancés. La sensibilité des antennes déjà opérationnelles (et même de celles que l'on projette de construire) est tout à fait insuffisante pour détecter les ondes émises par PSR 1913 + 16. Par contre, on espère observer des phénomènes astronomiques extrêmement violents tels que des explosions de supernovae, des collisions d'étoiles ou des formations d'éventuels trous noirs. Si elle s'avère possible, une telle détection ouvrira un chapitre nouveau et passionnant de l'astrophysique, en nous renseignant notamment sur le noyau de notre galaxie, région qui nous est pratiquement inaccessible par d'autres moyens d'observation.

3. La relativité générale donne une explication élégante et subtile des phénomènes gravitationnels. Toutefois son succès même laisse le théoricien insatisfait. Dans cette théorie, le champ gravitationnel est en effet entièrement géométrisé. Par contre le champ électromagnétique ne l'est pas, bien qu'il puisse servir de source au champ de gravitation, comme nous l'avons expliqué plus haut. Cette différence de nature est d'autant plus paradoxale que les deux types de champs obéissent à des lois de propagation identiques (c'est cette identité qui autorise, nous l'avons vu, à parler d'ondes gravitationnelles, par analogie avec les ondes électromagnétiques).

Pour surmonter cette dualité peu satisfaisante, les théoriciens ont essayé très tôt de construire une **théorie unitaire** susceptible d'unifier les champs gravitationnel et électromagnétique en un seul hyperchamp, cet hyperchamp étant lui-même conçu comme une *structure géométrique de l'univers*.

Depuis 1919, date à laquelle le mathématicien Hermann Weyl fit la première tentative, jusqu'aux années 50 (dernière théorie unifiée d'Einstein), les travaux consacrés à ce problème ont été très nombreux mais aucune des solutions proposées ne s'est révélée acceptable. D'une part, en effet, aucune signification physique vraiment claire n'a pu être dégagée des théories unitaires, soit parce que ces théories postulent arbitrairement que l'univers possède plus de quatre dimensions, soit parce que les grandeurs géométriques qui décrivent l'hyperchamp ne présentent aucune relation évidente avec l'expérience. D'autre part, deux nouvelles interactions ont été découvertes entre-temps : l'*interaction faible*, responsable des phénomènes de radioactivité, et l'*interaction forte*, qui explique la cohésion des noyaux atomiques. Toute tentative d'unification de la gravitation et de l'électromagnétisme est donc apparue de ce fait comme insuffisante a priori.

Malgré leur échec, ces tentatives n'ont cependant pas été inutiles, loin de là. En effet certaines idées mathématiques introduites pour développer les théories unitaires sont reprises actuellement dans un tout autre contexte, venu cette fois des progrès de la *théorie des particules élémentaires*. Les prolongements unitaires de la relativité générale auront donc contribué malgré tout à façonner une nouvelle image du monde physique.

La gravitation, un formidable défi ?

En cette fin de siècle, la gravitation

constitue un défi majeur pour la pensée physique, malgré les progrès accomplis dans sa compréhension par la relativité générale. Ce défi provient de l'isolement de la gravitation par rapport aux trois autres interactions connues (interactions faible, électromagnétique et forte). Isolement conceptuel, nous l'avons vu. Mais aussi et surtout, isolement expérimental. En effet, bien qu'elle soit prédominante à l'échelle cosmique, *la gravitation est en réalité une interaction faible*. Si on compare la force électrostatique et la force d'attraction newtonienne qui s'exercent entre deux protons par exemple, on obtient : $F_{\text{grav}}/F_{\text{el}} \approx 10^{-36}$. L'interaction gravitationnelle joue par conséquent un rôle négligeable à l'échelle des phénomènes nucléaires ou atomiques. Il ne semble donc pas que les expériences réalisées dans les accélérateurs puissent nous renseigner de sitôt sur la structure microscopique du champ de gravitation.

Dans le domaine macroscopique (mesures de G en laboratoire, mouvements des satellites et des sondes dans le système solaire, détection des ondes gravitationnelles, etc.), la situation est beaucoup plus prometteuse mais nécessite tout de même la mise en jeu de techniques très sophistiquées et coûteuses. Entreprises pendant longtemps sans plan d'ensemble, au gré des percées technologiques dans tel ou tel domaine, les recherches expérimentales ou observationnelles sur la gravitation se tournent actuellement vers des programmes à long terme. De la ténacité et de la cohérence avec lesquelles ces programmes seront poursuivis et développés dépendront tous les progrès futurs.

Pierre Teyssandier,

Laboratoire de physique théorique de l'institut Henri-Poincaré, Paris
(pour le chapitre sur Einstein)

Jean-Pierre Penot,

CNES, Toulouse
(pour les autres chapitres)

(Outre Pierre Teyssandier qui a effectué un gros travail d'écriture et de relecture pour ce numéro, je tiens également à remercier mes collègues du CNES et les enseignants de sciences physiques, membres de l'Union des physiciens, qui ont bien voulu relire mon premier manuscrit et me faire part de leurs critiques et de leurs suggestions. Qu'ils sachent combien leur aide m'a été précieuse.

J.-P. P.

Comme à l'accoutumée, la plupart des dessins de ce numéro ont été exécutés par les graphistes F. Boltana et J.-L. Reilles, 1 bis, rue J.-Marignac, Saint-Martin-du-Touch, 31300 Toulouse.)

(34) Voir *Les ondes gravitationnelles émises par un pulsar*, de J. Weinberg, J. Taylor et L. Fowler, Pour la science, n° 50, décembre 1981, et *Les ondes gravitationnelles*, par R. Ruffini, La recherche, novembre 1975.

Sarsat/Cospas, IRAS, etc.

France

Une montgolfière IR accomplit le tour du monde!

Une montgolfière infrarouge (MIR) a effectué le tour du monde en sept

semaines (*), emportant une charge utile de 65 kg dont 35 kg d'expériences scientifiques. L'expérience, préparée par le Laboratoire de météorologie dynamique (LMD), avait pour but l'étude des ondes de gravité. L'altitude du vol a varié entre 18 et 29 km.

La MIR qui vient d'accomplir cet exploit est un ballon(**) de

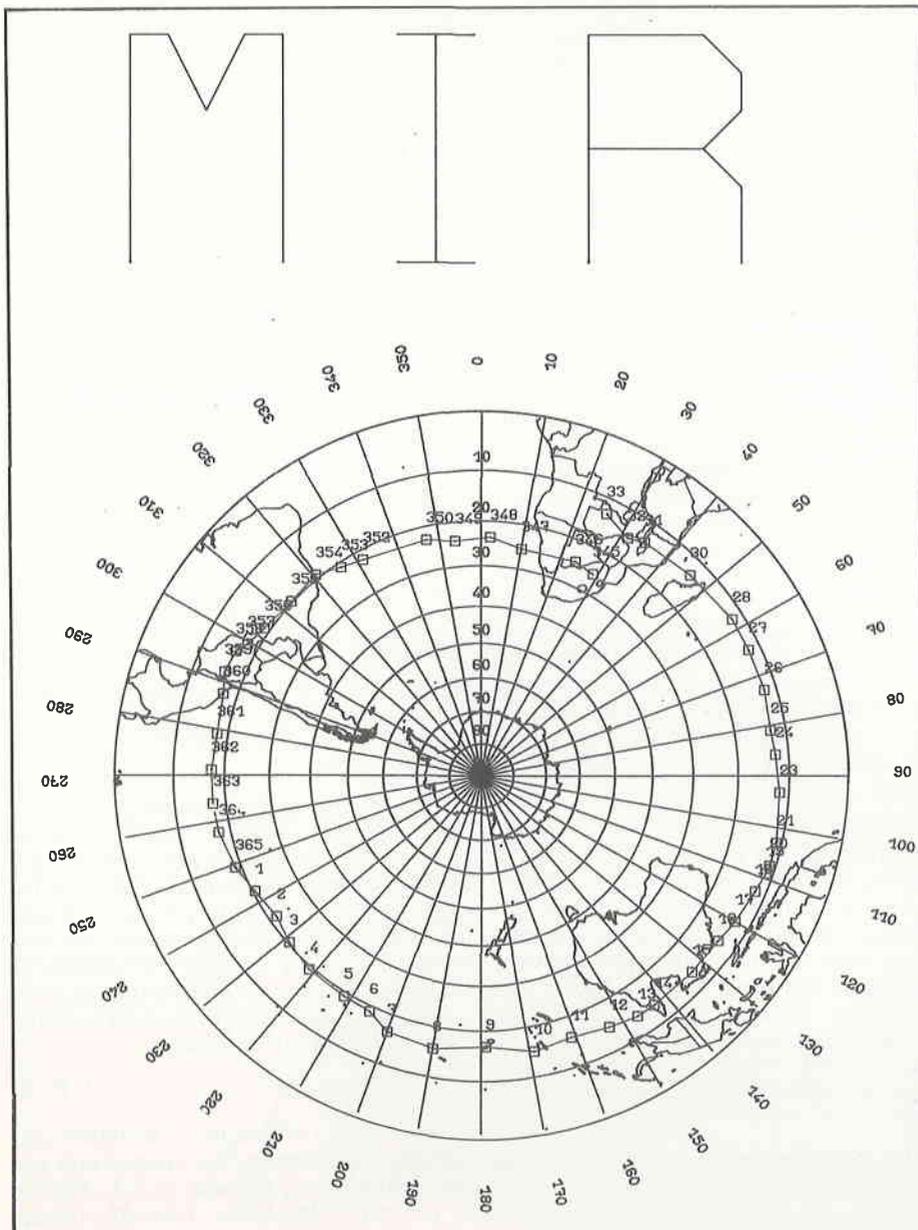
36 000 m³ de volume, qui se présente sous la forme d'un cylindre d'environ 40 m de diamètre (...). La partie supérieure est aluminisée, et la partie inférieure transparente, de sorte que la nuit le rayonnement infrarouge qui monte de la Terre est piégé à l'intérieur du ballon et chauffe de 25 à 30°C l'air qu'il contient. Cet air chaud assure à lui seul la sustentation du ballon et de la charge utile. En effet, l'originalité de ce ballon est de ne pas utiliser de gaz, hélium ou hydrogène, pour voler mais uniquement la poussée aérostatique due à la différence de température entre l'air intérieur et extérieur. Ceci est rendu possible grâce à la captation d'une énergie renouvelable: la chaleur que la Terre rayonne en permanence vers l'espace sous forme de flux infrarouge. Ce flux, de l'ordre de 300 W/m², permet d'assurer la sustentation de la MIR et de sa charge utile à une altitude de 22 km. De jour, l'énergie solaire directe et réfléchi (albedo) augmente considérablement la température de l'air contenu dans la MIR: des surtempératures de 80 degrés ont été enregistrées plusieurs fois pendant le vol conduisant le ballon à une altitude de 29 500 m.

Lors de la campagne précédente (voir EI, n° 24, p. 19) une montgolfière du même type avait volé pendant dix-sept jours, avant de chuter – de nuit – en survolant une zone nuageuse froide. Au-dessus de telles zones le flux infrarouge reçu par le ballon n'est plus suffisant pour créer un échauffement de l'air assurant la sustentation du ballon et de sa charge utile. L'interprétation des mesures physiques effectuées lors de ce vol et des données radiométriques en provenance de Météosat a permis de prédéterminer une saison

(*) Lancée de Pretoria (Afrique du Sud), le 11 décembre 1982, elle est tombée en Zambie le 2 février 1983.

(**) Construit par la société Zodiac Espace, à Ayguesvives, près de Toulouse.

Trajectoire de la montgolfière infrarouge lancée en décembre 1982; les nombres correspondent aux quantités de l'année (Document CNES).



(l'été austral) pour laquelle les conditions de vol étaient optimales. Le vol qui vient d'avoir lieu dans l'hémisphère Sud confirme tout à fait cette prévision : en effet, à trois reprises au cours du vol la MIR a survolé des zones tout aussi contraignantes que celle qui avait causé sa chute l'an passé. Des mesures faites à bord montrent qu'elle s'est toujours stabilisée, même si parfois l'altitude du plafond de nuit était limitée : en effet des dispositifs de sécurité mettent fin au vol si le ballon descend au-dessous de 18 000 m.

Après un tour du monde et cinquante-trois jours de données enregistrées par les systèmes de télémesure Argos et Chagal, la MIR DTA 82 est tombée au sol en Zambie au moment où elle survolait une masse nuageuse un peu plus froide que les autres (...).

Un prochain vol de montgolfière est maintenant prévu pendant le prochain été austral, en novembre-décembre 1983 avec une expérience du Service d'aéronomie.

(Source : La Lettre du CNES, n° 85, 3 mars 1983, p. 20.)

Le système Sarsat/Cospas en phase de démonstration

C'est en 1979 qu'a été signé le protocole d'accord concernant le programme Sarsat(*) entre le Canada (ministère des communications), les États-Unis (NASA) et la France (CNES).

Cette coopération a ensuite été étendue à l'Union soviétique qui développe le système Cospas, compatible avec le système Sarsat.

L'objectif de ce programme est de démontrer que des équipements installés à bord de satellites peuvent améliorer nettement la détection et la localisation des signaux de détresse émis par des balises placées à bord des avions civils et sur certains types de navires.

★ Le système Sarsat

Le programme Sarsat a deux objectifs principaux :

- améliorer les moyens actuels d'aide à la recherche et au sauve-

tage qui reposent sur l'utilisation de balises existantes à 121,5 et 243 MHz;

- démontrer la validité, l'efficacité opérationnelle et les avantages inhérents au concept 406 MHz (dérivé d'Argos) qui utilise de nouvelles balises spécialement conçues pour cette application et fonctionnant dans la bande 406-406,1 MHz réservée à cet usage par la Conférence administrative mondiale des radiocommunications de 1979.

Le système Sarsat est en conséquence constitué de deux sous-ensembles distincts : un système 121,5/243 MHz et un système 406 MHz, qui utilisent en commun un ensemble de moyens spatiaux et terrestres adaptés au traitement de chaque type de balises. Dans les deux cas, le satellite joue le rôle de relais des émissions de détresse et la localisation de l'émetteur est obtenue à partir des « mesures » du décalage Doppler qui affecte la liaison montante balise-satellite.

● **Le système 121,5/243 MHz.** Dans le système 121,5/243 MHz, le satellite se comporte en simple répéteur des signaux émis par les balises et la mesure Doppler est effectuée à la station sol de réception.

La couverture du système est donc géographiquement limitée par la contrainte de visibilité simultanée entre balise, satellite et station sol. Les caractéristiques des signaux 121,5/243 MHz limitent les performances du système en ce qui concerne la précision obtenue en localisation (20 km) et le nombre de détresses pouvant être traitées simultanément (10 au maximum dans la zone de visibilité du satellite). Notons, enfin, qu'en l'absence de codage du signal émis, l'identité de l'émetteur ne peut être connue.

Par rapport à la situation actuelle, le système Sarsat à 121,5/243 MHz apportera néanmoins une amélioration notable, mais limitée, dans les zones de couverture des stations locales. Ces limitations n'existent plus avec le système à 406 MHz.

● **Le système 406 MHz.** Le signal émis par la balise 406 MHz, répété toutes les cinquante secondes, comporte un code fournissant l'identité, la nationalité du véhicule en détresse ainsi que des informations sur la nature de cette détresse. L'émission est traitée à bord du satellite. L'information suit alors deux voies différentes :

- elle est réémise et sera donc immédiatement reçue au sol si le satellite se trouve en visibilité d'une station locale;

- elle est simultanément stockée dans la mémoire du satellite pour une retransmission ultérieure lorsque le satellite passe en visibilité d'une station sol. Le système offre ainsi une couverture complète du globe.

Le système 406 MHz présente enfin, par rapport au système 121,5/243 MHz, un gain de performance considérable; la localisation est obtenue avec une précision de l'ordre de 3 km et un maximum de 90 balises peuvent être prises en compte simultanément par le satellite.

● **Le segment spatial et le segment sol.** Les équipements Sarsat (récepteurs 121,5/243 MHz et récepteur-processeur 406 MHz) sont embarqués sur les satellites américains de la série Advanced TIROS-N/NOAA. Ces satellites sont placés sur une orbite quasi polaire, héliosynchrone, à 850 km d'altitude environ. Le segment sol du système est constitué :

- d'une part, des balises de détresse 121,5/243 MHz ou 406 MHz;

- d'autre part, d'un réseau de stations sol locales situées dans chaque pays.

Trois stations ont été réalisées aux États-Unis, une au Canada, une en Norvège et une en France (installée au Centre spatial de Toulouse). Chaque station est reliée à un Centre de contrôle de mission (MCC) qui assure les échanges d'informations nécessaires avec les autres MCC et avec les centres opérationnels responsables de l'alerte de détresse et des opérations SAR (Search And Rescue). Le réseau des stations Sarsat est complété et relié via le MCC de Moscou aux trois stations Cospas installées en Union soviétique. Le MCC français (Toulouse) est ainsi directement relié aux MCC américains (Scott A.F.B.), norvégien (Tromsø) et soviétique (Moscou).

★ Le système Cospas

Le système Cospas présente les mêmes caractéristiques que le système Sarsat du point de vue de l'utilisateur, les satellites Sarsat ou Cospas relaieront les mêmes émissions de détresse vers les mêmes stations sol. Seule différence toutefois, les satellites Cospas ne compor-

(*) Sarsat : Search And Rescue SATellite, c'est-à-dire satellite pour la recherche et le sauvetage.

tent pas de répéteur à 243 MHz. Cette fréquence est plus particulièrement utilisée par l'aéronautique militaire.

★ Situation actuelle du programme

Le programme Sarsat prévoit l'équipement de trois satellites américains de la NOAA (NOAA-E, F et G) avec les répéteurs à 121,5 et 243 MHz fournis par le Canada et les récepteurs-processeurs à 406 MHz fournis par le CNES. Chaque pays s'engage en outre à réaliser les équipements sol nécessaires à la conduite d'une phase d'évaluation technique et de démonstration du système. Une extension du programme initial est actuellement à l'étude, elle comportera l'équipement de trois satellites supplémentaires (NOAA-H, I et J) avec les instruments fournis par le Canada et par la France. Avec six satellites, la continuité du service sera assurée jusqu'en 1990 environ. Le lancement de NOAA-8 (nom pris par NOAA-E après sa mise sur orbite) a eu lieu le 28 mars 1983.

Le programme Cospas comporte, au stade actuel, la réalisation de deux satellites dont le premier, Cospas-1, a été lancé avec succès le 30 juin 1982. Si la réussite de la démonstration est confirmée, il est probable que d'autres satellites soviétiques viendront compléter les satellites NOAA.

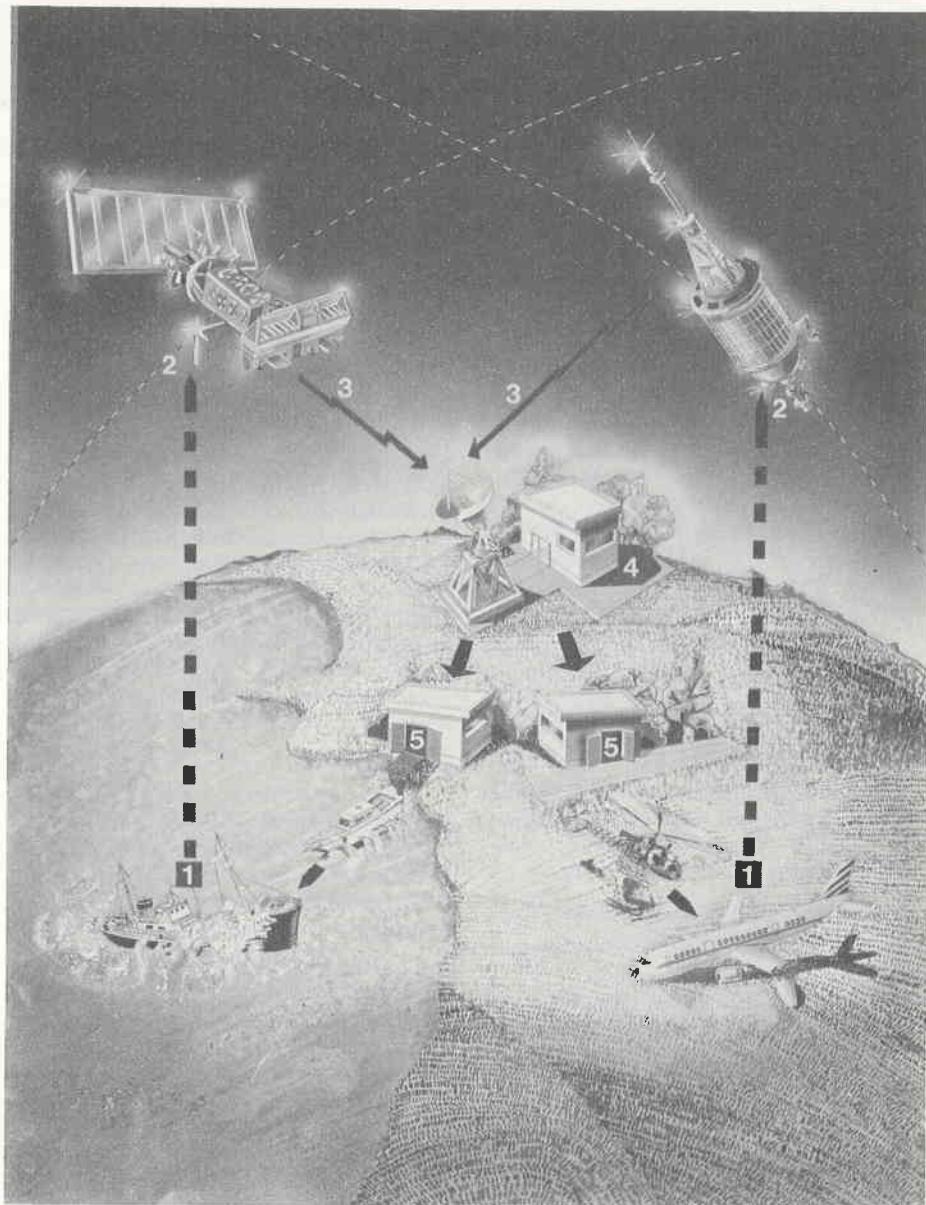
D'autres pays, depuis 1979, ont manifesté leur intérêt pour l'expérimentation Sarsat : le Royaume-Uni et la Norvège ont ainsi été officiellement associés à la démonstration du système conjoint Cospas-Sarsat par la signature d'un accord avec les partenaires Sarsat. Des contacts sont en cours avec la Finlande et le Japon dans le même but. La Suède, liée à la Norvège par un accord particulier, a été également admise à participer à la démonstration.

★ Quelques exemples de sauvetage

En 1982, la localisation par le système Sarsat/Cospas a permis de sauver sept personnes aux États-Unis et au Canada :

- en Colombie britannique, le 8 septembre, par le centre de contrôle de missions canadien;

- au Québec, au nord de Montréal, le 3 octobre, par le même centre;



Le sauvetage par satellite au moyen du système Sarsat/Cospas. 1 : émission de la balise de détresse; 2 : réception et prétraitement par satellite (Sarsat ou Cospas); 3 : transmission des données prétraitées; 4 : réception et identification de la détresse; 5 : déclenchement des moyens de sauvetage (Document CNES).

- à Cape Cod, près de Boston, le 11 octobre, par le centre de contrôle de missions américain.

Les circonstances de la première localisation, en Colombie britannique, illustrent parfaitement ce que l'on peut attendre du système : précision de localisation, permettant une rapidité d'intervention (26 heures au lieu de 4 à 5 jours estimés nécessaires par les services de sauvetage canadiens) et une économie des moyens (20 heures de vol avions et hélicoptères comparées aux 1 780 heures de vaines recherches effectuées pour un accident analogue survenu quelques mois avant, dans la même région).

En France, depuis le 1^{er} septembre 1982, le CNES et l'Aviation civile mettent en œuvre le Centre de contrôle de missions français qui assure à Toulouse le traitement de tous les passages du satellite soviétique Cospas-1.

Au cours du dernier trimestre 1982, ce centre est intervenu à la demande d'organismes de recherches et de sauvetage français et étrangers (33 interventions en temps réel).

Lors de la course « La Route du Rhum », le système Sarsat/Cospas a confirmé la localisation par Argos du naufrage du bateau « Rennie » au large des Açores.

Depuis le début de 1983, plusieurs émissions de balises de détresse actuelles en 121,5 MHz ont été détectées par le système Sarsat/Cospas. Dans deux de ces cas (au large de Monaco et à Montélimar) la première information de l'alerte a été détectée par le satellite, ce qui a permis de constater en moins de 40 minutes qu'il s'agissait de mises en marche intempestives de balises de détresse.

Le vendredi 28 janvier 1983, à 16 h 30, le CCM de Toulouse détecte et localise, lors du passage du satellite soviétique Cospas-1, une émission à la fréquence 121,5 MHz susceptible de provenir d'une radiobalise de détresse située à 800 km à l'ouest des îles Canaries.

Cette information est transmise au centre de contrôle de la navigation aérienne de Las Palmas (Espagne) qui demande aux pilotes de se mettre à l'écoute de cette fréquence, opération qui ne donne aucun résultat.

Le samedi 29 janvier 1983, à 14 h, la localisation déterminée la veille est confirmée par les équipes de contrôleurs de l'Aviation civile et du CNES.

Les autorités espagnoles décident alors de mettre en œuvre un avion Fokker F27 spécialement équipé. A 16 h, le pilote de cet avion aperçoit un canot pneumatique avec deux personnes à bord à cinq kilomètres de la position fournie deux heures avant par la station de Toulouse et largue aussitôt une « chaîne de survie ».

Le sauvetage sera effectué le dimanche 30 janvier 1983, à 2 h 56, par un navire britannique alerté par le pilote de l'avion de recherche. Les naufragés sont deux Espagnols de 19 et 22 ans qui avaient entrepris la traversée de Ténériffe au Vénézuéla à bord d'un catamaran.

Le CCM Sarsat/Cospas installé au Centre spatial de Toulouse, qui est à l'origine de ce sauvetage, a été réalisé conjointement par le ministère de la Mer, le ministère des Transports et le CNES.

En France, les administrations responsables de l'alerte, des recherches et du sauvetage aéronautiques et maritimes apporteront leur concours au CNES au cours de la phase de démonstration qui a commencé le 1^{er} février 1983.

Les partenaires Sarsat et Cospas espèrent que leur démonstration commune conduira à la mise en place progressive (peut-être au

début de la prochaine décennie) d'un système opérationnel mondial d'aide aux recherches et au sauvetage par satellites.

(Sources : divers documents CNES)

Europe

Ariane prête pour un sixième lancement

A la fin du mois de février, le CNES et l'ESA publiaient le communiqué de presse suivant :

A sa session des 23 et 24 février 1983, le Conseil de l'Agence spatiale européenne a pris note de l'avancement du programme Ariane et a examiné les conséquences du retard pris par le programme, en raison de l'échec du lancement Ariane L5 (1), sur les missions à venir.

Situation technique du programme

Les recommandations techniques formulées par la Commission d'enquête, qui portaient sur la qualité des engrenages de la turbopompe et le fonctionnement du système de lubrification (voir communiqué ESA-CNES du 21 octobre 1982), ont été mises en œuvre.

Au cours des mois écoulés, des versions des engrenages de la turbopompe et du système de lubrification, éliminant les déficiences constatées, ont été réalisées et essayées. L'ensemble des travaux est soumis à un processus de revue détaillé destiné à confirmer l'aptitude au vol du lanceur L6.

Après rodage et contrôle, la turbopompe du lanceur L6 a été montée sur le moteur du 3^e étage. Les essais de recette à feu du moteur doivent avoir lieu d'ici à la mi-mars, l'assemblage de l'ensemble propulsif, puis de l'étage complet, devant intervenir ensuite et conduire au transport en Guyane du 3^e étage à la fin du mois d'avril. Les deux premiers étages seront acheminés dès le mois de mars.

Parallèlement aux dispositions spécifiques à la turbopompe, une vérification approfondie de certains éléments importants du lanceur a été effectuée (centrale inertielle, système d'alimentation et de pressurisation du 3^e étage), afin d'en renforcer la fiabilité.

Calendrier des lancements

Le Conseil, après avoir pris connaissance de ces éléments, a confirmé sa confiance unanime et son soutien au programme Ariane et a fixé le calendrier de lancement suivant : le lancement d'Ariane L6 est prévu le vendredi 3 juin 1983 et les lancements L7, L8, L9 respectivement les 26 août 1983, 4 novembre 1983 et janvier 1984.

En outre, le Conseil, soucieux des intérêts des programmes de l'Agence et de la confiance manifestée par les autres clients d'Ariane et des obligations calendaires contractées, a pris les dispositions suivantes, destinées à permettre le lancement le plus rapidement possible de chacune des charges utiles :

- en vue de reproduire un profil de mission aussi proche que possible de celui prévu pour L5 (mission double comportant l'injection en orbite de transfert géostationnaire de deux satellites au moyen du système de lancement double Ariane, Sylدا) Ariane L6 lancera les satellites ECS-1 (2) et Amsat (3);

- en ce qui concerne le satellite européen d'observation du rayonnement X (Exosat), le Conseil de l'Agence a tenu compte, d'une part, que la date de lancement prévue pour L7 présente une marge calendaire insuffisante par rapport à la fermeture de la fenêtre de lancement et, d'autre part, des risques de dégradation de certaines expériences de la charge utile. Donc, et afin de répondre aux désirs de la communauté scientifique européenne, pour un lancement dès que possible, le Conseil a décidé de recourir à un Thor Delta 3914 pour la mise en orbite de ce satellite; ce lancement doit avoir lieu fin mai 1983 depuis la base de Vandenberg. L'exemplaire d'Ariane-1 excédentaire à la fin de la série de promotion sera affecté au lancement, en juillet 1985, de la sonde Giotto de l'Agence spatiale européenne, dont la mission est d'effectuer un rendez-vous avec la comète de Halley début 1986. Les lanceurs L7, L8 et L9 sont affectés

(1) Antérieurement au lancement L5, le lanceur Ariane a effectué 4 lancements d'essais, dont 3 avec succès. Ces essais ont permis la mise en orbite de six charges utiles dont les plus importantes sont le satellite météorologique Météosat (ESA) et les satellites de télécommunications Apple (Inde) et Marecs-A (ESA/Inmarsat).

(2) ECS : satellite de télécommunications européen ESA/Eutelsat.

(3) Amsat : satellite de télécommunications pour les radio-amateurs.

aux satellites Intelsat V F7, F8 et F9 de l'Organisation internationale des télécommunications par satellites.

Le premier lancement de la version Ariane-3, L10, est prévu en mars 1984. Ariane-3 est une version plus puissante du lanceur capable d'injecter simultanément en orbite de transfert géostationnaire deux satellites d'un poids unitaire allant jusqu'à 1 195 kg. Ariane-3 lancera les satellites de l'Agence ECS-2 et Marecs-B2, les satellites français Télécom-1A et 1B et celui de la Ligue arabe Arabsat-1, ainsi que les satellites américains Westar-6 de la Western Union, Spacenet-1 et 2 de la Southern Pacific et G. Star-1 et 2 de la GTE.

(Source : communiqué de presse CNES/ESA du 24 février 1983)

Reste du monde

IRAS, un satellite pour l'astronomie infrarouge

Le 26 janvier dernier a été lancé, depuis la base américaine de Vandenberg (Californie), au moyen d'une fusée Delta 3910, le satellite néerlandais IRAS (InfraRed Astronomical Satellite), fruit d'une coopération entre les Pays-Bas, la Grande-Bretagne et les États-Unis.

Conformément aux prévisions, il a été placé sur une orbite héliosyn-

chrone pratiquement circulaire, vers 900 km d'altitude. Il est de structure cylindrique et pèse de l'ordre de 1 050 kg.

Sa mission consistera en l'étude des sources infrarouges de l'espace. Pour l'essentiel on lui demandera d'effectuer une observation systématique de la quasi-totalité de la sphère céleste dans quatre bandes spectrales de l'infrarouge centrées sur 10, 25, 50 et 100 microns. Il consacra environ 60 % de son temps à cette observation qui permettra l'établissement de cartes et de catalogues des sources infrarouges du ciel.

Les 40 % de temps restant seront affectés à des tâches particulières : étude de sources IR déjà connues,...

IRAS s'intéressera donc à plusieurs catégories d'objets célestes : étoiles relativement tièdes ou froides émettant essentiellement dans l'infrarouge, étoiles déjà recensées dans d'autres domaines spectraux, hypothétiques planètes mineures, nuages moléculaires ou ionisés ou de poussières interstellaires, astéroïdes, météorites, notre noyau galactique, autres galaxies, ... Bien entendu sa mission pourrait conduire à la mise en évidence de phénomènes astronomiques insoupçonnés ou à celle de corps célestes totalement inconnus parce qu'exclusivement visibles en infrarouge...

L'observation en infrarouge présente des difficultés spécifiques. Depuis le sol l'absorption atmosphérique en limite sérieusement les résultats. De plus, même dans l'es-

pace, il faut se protéger des multiples « sources chaudes » génératrices d'infrarouges : le Soleil, la Terre et même les autres planètes. Pour les instruments de détection utilisés — extrêmement sensibles — le satellite lui-même et les pièces du télescope peuvent constituer des sources parasites... d'où la nécessité de maintenir à la plus faible température possible tout ce qui entoure les détecteurs.

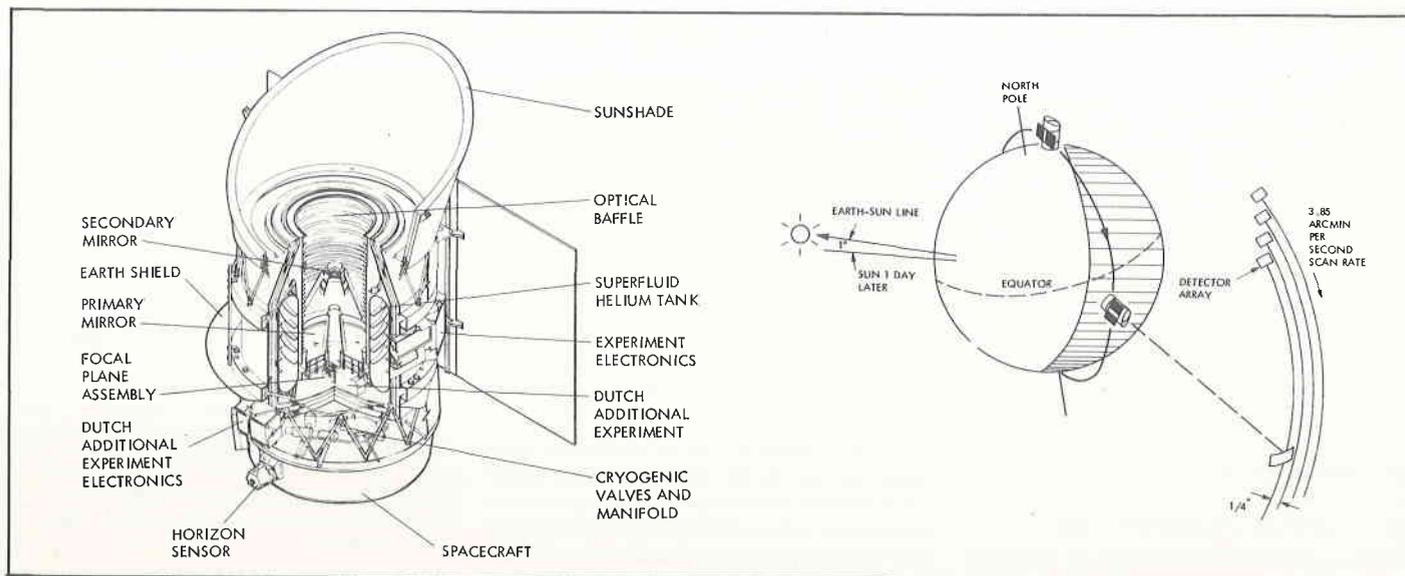
Outre trois instruments néerlandais (deux photomètres et un spectromètre), IRAS emporte un télescope de fabrication américaine composé notamment de deux miroirs. C'est un instrument unique à deux points de vue :

- sa sensibilité est presque cent fois meilleure que celle des télescopes civils utilisés à ce jour en infrarouge spatial,

- sa durée de vie théorique lui assurera la couverture complète du ciel. Ces performances tiennent à la qualité des détecteurs (installés dans le plan focal du télescope) et à l'excellence du système destiné à les refroidir. L'instrument est en effet placé dans une enceinte toroïdale où circule de l'hélium superfluide qui refroidit les détecteurs à environ 2 K ($\approx -271\text{ }^\circ\text{C}$) et maintient la température de ses parois internes à 10 K.

IRAS emporte 76 kg d'hélium ce qui devrait lui assurer une durée de vie de six à dix mois.

Comme l'indique le schéma ci-dessous, le télescope baliera la sphère céleste du fait de sa rotation autour de l'axe satellite/Soleil au



A gauche : la configuration du satellite IRAS; à droite : le balayage effectué par son télescope du fait de son mouvement orbital (Document Spaceflight).

rythme moyen d'une révolution par orbite (il en parcourra environ 14 chaque jour). Par ailleurs, en raison de l'héliosynchronisme (voir EI, n° 20, p. 7) qui se traduit par une précession quotidienne de un degré du plan orbital, la géométrie de l'ensemble plan orbital/Soleil est conservée et le télescope peut scruter systématiquement la totalité de la sphère céleste en six mois.

(Source : numéro spécial de *Journal of the British Interplanetary Society*, janvier 1983.)

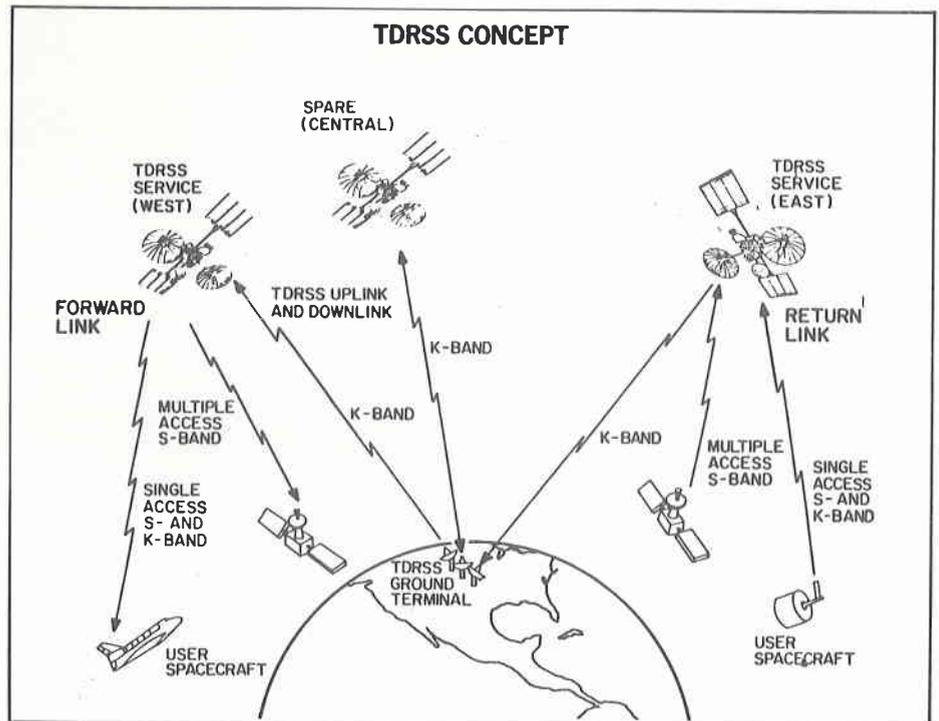
Deuxième vol opérationnel de la Navette

C'est avec un retard d'environ dix semaines sur le calendrier initial que s'est déroulée la sixième mission de la Navette spatiale (STS-6), du 4 au 9 avril 1983.

A l'origine de cet important retard : d'une part, les difficultés rencontrées avec les moteurs de l'orbiteur, d'autre part, la nécessité de procéder au dépoussiérage de TDRS-1 en raison des vents violents ayant soufflé sur Cap Canaveral le 28 février.

Pour les cinq premiers vols, la NASA avait utilisé l'orbiteur Columbia qui est aujourd'hui en cours de modification (en particulier pour pouvoir accueillir le Spacelab et un équipage de six hommes, à l'automne prochain). Comme prévu (voir EI, n° 22, p. 20), c'est un deuxième orbiteur, **Challenger**, qui a été mis en service pour cette sixième mission, en fait le deuxième vol opérationnel du complexe spatial appelé Navette.

Certaines améliorations lui ont été apportées : masse réduite de plus d'une tonne, puissance des moteurs principaux augmentée (104 % de la valeur nominale contre 100 % pour Columbia; chaque % gagné se traduit par un gain de 454 kg sur la charge utile), mise en place d'un nouvel équipement facilitant l'atterrissage automatique, environ 30 000 tuiles de la protection thermique densifiées ce qui augmentera leur durabilité et plus de 600 autres remplacées par un nouveau revêtement protecteur, etc. Contrairement à Columbia, Challenger ne comporte plus de sièges éjectables ce qui accroît la capacité



Pour des raisons techniques et économiques, les États-Unis ont décidé d'assurer le dialogue entre les techniciens au sol et leurs futurs satellites au moyen de satellites spécialisés, les TDRS, plutôt que par l'intermédiaire des stations sol actuellement en service (Document NASA).

d'accueil du niveau supérieur de la cabine de pilotage.

Par ailleurs, l'utilisation de nouveaux modèles du réservoir extérieur et des boosters conduit à un gain de plusieurs tonnes.

Quatre astronautes de la NASA formaient l'équipage : Paul J. Weitz (50 ans 1/2), commandant de bord; Karol J. Bobko (45 ans), pilote; Dr Story F. Musgrave (47 ans 1/2) et Donald H. Peterson (49 ans 1/2) en tant que spécialistes de la mission.

Au programme de la mission inaugurale de Challenger :

— la mise sur orbite du satellite géostationnaire TDRS-1 (Tracking and Data Relay Satellite) qui doit servir à la NASA pour relayer les communications (voix et données numériques) entre ses satellites et le sol.

Comme c'est un très lourd satellite (masse $\approx 2,3$ t; envergure de 17,4 m lorsque ses panneaux sont déployés), il a fallu l'associer à un étage supérieur plus performant que celui utilisé sur STS-5 (voir EI, n° 24, p. 25) : c'est l'IUS (Inertial Upper Stage; longueur : 5,1 m; diamètre : 2,8 m; masse : 14,7 t; voir EI, n° 22, p. 7) qui est chargé de le faire pas-

ser de l'orbite basse de la Navette (≈ 280 km) à l'orbite haute ($\approx 36 000$ km) qu'exige sa mission.

Le complexe TDRS-1/IUS mesure 12 m de long et pèse de l'ordre de 18,5 t. Installé sur une table basculante faisant office de rampe de lancement, il quitte la soute de Challenger le 5 avril et est mis à feu peu après. Mais en raison d'une défaillance du second étage de ce « remorqueur spatial », le satellite ne pourra gagner l'orbite prévue ($\approx 22 000/35 000$ km et $i = 2,4^\circ$ au lieu des 36 000 km et $i = 0$ visés). Néanmoins, grâce à des manœuvres appropriées, la NASA estimait être en mesure de « sauver » TDRS-1 et de le mettre à poste en quelques semaines sans compromettre sa durée de vie théorique de dix ans.

— la mise en œuvre de plusieurs expériences scientifiques :

- ★ une expérience d'électrophorèse et une autre pour la fabrication de petites sphères de latex (voir EI, n° 22, p. 30);

- ★ une étude sur les éclairs atmosphériques;

- ★ une étude du mal de l'espace (le docteur Musgrave a soumis ses coéquipiers à différentes expériences et à des analyses médicales);

- ★ trois expériences du programme *Getaway Special* : une pour l'étude du

processus de formation de neige artificielle en impesanteur, une deuxième pour l'étude du conditionnement des graines en vue de l'approvisionnement des stations spatiales et des bases lunaires du XXI^e siècle, une troisième relevant de plusieurs disciplines;

★ quelques expériences technologiques;

★ etc.

— **une sortie dans l'espace.** Prévée puis annulée sur STS-5, cette sortie a débuté le 7 avril : pendant près de quatre heures, Musgrave et Peterson ont évolué dans la soute de Challenger. Il s'agissait pour eux de tester les combinaisons spatiales de la nouvelle génération (coût unitaire : ≈ deux millions de dollars) mais aussi de préparer les activités extra-véhiculaires des futures missions de la Navette. Dans ce but, ils ont manipulé différents outils spéciaux, répété plusieurs exercices particuliers, actionné le treuil servant à la mise en configuration manuelle de la table basculante, évalué la luminosité de la soute,...

(La dernière sortie dans l'espace d'astronautes américains date de février 1974 avec Gibson et Carr/Skylab.)

Conformément au programme de vol, Challenger revenait sur Terre le 9 avril au terme de **cinq jours et quelques minutes** dans l'espace. Pour la première fois, un orbiteur atterrissait sur une piste en béton à la base Edwards (utilisé pour les missions antérieures, le lac salé était impraticable par suite de fortes pluies). Aux dires des responsables de la NASA, la mission STS-6 était un succès quasi total.

Les prochains vols de la Navette sont prévus pour juin 1983 (STS-7), août 1983 (STS-8), septembre 1983 (STS-9) et novembre 1983 (STS-10).

(Sources : *Aviation Week and Space Technology*, 11 et 18 avril 1983 ; *Press Kit NASA*, avril 1983 ; *Le Monde*, 9 avril 1983)

J.-P. P.

(Tous les passages reproduits ici en italique correspondent à des extraits n'ayant subi aucune intervention de la part du signataire de cette rubrique. Ils proviennent tels quels des documents cités en référence.)



Bases de lancement :

URSS : Plesetsk, Tyuratam-Baïkonour, Kapustin Yar

E-U : Cap Canaveral, Vandenberg, île Wallops

Japon : Kagoshima, Tanegashima

ASE : Kourou (Centre spatial guyanais)

Inde : Sriharikota

Chine : Shuang Cheng Tse

Juillet 1982

- 6 - Lancement (Plesetsk) de **Cosmos-1385** (197/264 km - 82,3° - 88,7 mn) pour une mission de reconnaissance ou de télédétection de ressources terrestres. Récupéré le 20 juillet. [1982-68A]
- 7 - Lancement (Plesetsk) de **Cosmos-1386** (965/1 010 km - 83° - 104,6 mn) sans doute pour la navigation. [1982-69A]
- 10 - Lancement (Baïkonour) du véhicule automatique de ravitaillement, inhabité, **Progress-14** (192/258 km - 51,6° - 88,7 mn) qui rejoint Saliout-7 le 12 juillet. Il est décroché le 10 août et détruit selon le scénario habituel (voir EI, n° 23, p. 19). [1982-70A]
- 13 - Lancement (Plesetsk) de **Cosmos-1387** (219/271 km - 82,3° - 89,1 mn) pour une mission de reconnaissance ou de télédétection de ressources terrestres. Récupéré le 26 juillet. [1982-71A]
- 16 - Lancement (Vandenberg) du quatrième satellite de la série Landsat,

Landsat-4 (héliosynchrone, 678/696 km - 98,3° - 98,5 mn) pour la télédétection des ressources terrestres. Sa durée de vie théorique est de trois ans (voir EI, n° 24, p. 24). [1982-72A]

Quelques semaines plus tard, il connaissait des difficultés en raison de perturbations intermittentes affectant son système d'alimentation électrique. En avril 1983, les responsables de Landsat-4 déclaraient que si ces troubles devenaient permanents, sa mission serait gravement compromise.

- 21 - Lancement (Plesetsk) par une même fusée de huit satellites, **Cosmos-1388, 1389, ..., 1395** (≈ 1 450/1 500 km - 74° - 115 mn) vraisemblablement pour les télécommunications militaires du gouvernement. [1982-73A, ..., 73H]
- Lancement (Plesetsk) du cinquante-cinquième satellite de la série **Molnya-1** (650/38 900 km - 63° - 11 h 41 mn) pour les télécommunications du réseau national Orbita. [1982-74A]
- 27 - Lancement (URSS) de **Cosmos-1396** (208/323 km - 72,9° - 89,5 mn) peut-être pour une mission de reconnaissance/surveillance militaire. Récupéré le 10 août. [1982-75A]
- 29 - Lancement (Kapustin Yar) de **Cosmos-1397** (346/549 km - 50,7° - 93,4 mn), peut-être pour une mission de calibration radar. [1982-76A]

Août 1982

- 3 - Lancement (Plesetsk) de **Cosmos-1398** (225/262 km - 82,3° - 89 mn) peut-être pour une mission de reconnaissance ou de télédétection. Récupéré 10 jours plus tard. [1982-77A]
- 4 - Lancement (Baïkonour) de **Cosmos-1399** (179/371 km - 64,9° - 89,7 mn) peut-être pour la reconnaissance/surveillance. Récupéré ou rentré dans l'atmosphère 43 jours plus tard. [1982-78A]
- 5 - Lancement (Plesetsk) de **Cosmos-1400** (631/675 km - 81,2° - 97,6 mn) probablement pour l'écoute électronique. [1982-79A]
- 19 - Lancement (Baïkonour) du vaisseau spatial **Soyouz T-7** (228/280 km - 51,6° - 89,5 mn) avec trois passagers : L. Popov, A. Serebrov et S. Savitskaya, la deuxième femme de l'espace. Il s'accroche à Saliout-7 le lendemain. C'est à bord de ce vaisseau que Lebedev et Berezovoy regagneront la Terre le 10 décembre, au terme d'un séjour de plus de 211 jours dans l'espace (voir EI, n° 24, p. 23). [1982-80A]
- 20 - Lancement (Plesetsk) de **Cosmos-1401** (226/282 km - 82,3° - 89,3 mn) peut-être pour l'observation des ressources terrestres. Récupéré 14 jours plus tard. [1982-81A]
- 26 - Lancement (Cap Canaveral) par une fusée américaine Thor Delta 3920 PAM du satellite canadien de télécommunications nationales **Anik-D1** alias Télésat-F (géostationnaire par 104° Ouest).

Il dispose de 24 canaux fonctionnant sur 4-6 GHz, chaque canal pouvant relayer un programme de TV couleurs et 480 communications téléphoniques. Sa durée de vie théorique est de 8 ans. Il est destiné à remplacer Anik-A2 et Anik-A3 lancés en 1973 et 1975. [1982-82A]

- 27 - Lancement (Plesetsk) du dix-neuvième satellite de la série **Molnya-3** (494/40 814 km - 62,8° - 12 h 16 mn) pour les télécommunications. [1982-83A]
- 30 - Lancement (Baïkonour) de **Cosmos-1402** (254/279 km - 65° - 89,6 mn) sans doute pour la surveillance océanique militaire. Son retour dans l'atmosphère a fait craindre - pendant un temps - le renouvellement de l'aventure de Cosmos-954 (lancé le 18-09-1977) et dont les débris radioactifs avaient atteint le sol canadien en janvier 1978.

Mais cette fois c'est apparemment sans dommages que les débris du satellite auraient été détruits, pénétrant en trois temps dans l'atmosphère terrestre : le 30 décembre (le radar et son électronique ?), le 23 janvier (la partie principale de la structure) et le 7 février (le réacteur nucléaire) au-dessus de l'Atlantique Sud. [1982-84A]

Septembre 1982

- 1^{er} - Lancement (Baïkonour) de **Cosmos-1403** (216/380 km - 70,4° - 90,2 mn) peut-être pour la reconnaissance/surveillance militaire. Récupéré 14 jours plus tard. [1982-85A]
- Lancement (Plesetsk) de **Cosmos-1404** (211/394 km - 72,9° - 90,2 mn) peut être pour la reconnaissance/surveillance militaire. Récupéré 14 jours plus tard. [1982-86A]
- 3 - Lancement (Tanegashima) du satellite technologique japonais **ETS-3** (Engineering Test Satellite) alias Kiku-4 (965/1 228 km - 44,6° - 107,1 mn). Sa masse est de 385 kg. Il a été placé sur orbite par le lanceur japonais N-1 dont c'était la dernière mission. Parmi ses missions : test du système de contrôle d'attitude et du système de contrôle thermique, déploiement de panneaux solaires de conception japonaise, ... [1982-87A]
- 4 - Lancement (Baïkonour) de **Cosmos-1405** (438/456 km - 65° - 93,3 mn) peut-être pour la surveillance océanique. Il serait équipé d'un générateur conventionnel. [1982-88A]
- 8 - Lancement (Plesetsk) de **Cosmos-1406**. (222/253 km - 82,3° - 89 mn) pour une mission de reconnaissance photographique ou d'observation des ressources terrestres. Récupéré 13 jours plus tard. [1982-89A]

Au sommaire des anciens numéros d'Espece Information

Les stocks des six premiers numéros sont épuisés et aucun retraitage n'est envisagé pour le moment.

N° 7 (1^{er} trimestre 1976, 12 pages) : **les satellites géodésiques** (4 p); **le vol de la fusée** (4 p); bilan de l'année 1975 (1 p); les 10 % et l'espace (1 p); un club aérospatial dans ma région ? (1 p); calendrier (1 p).

N° 8 (2^e trimestre 1976, 12 pages) : **l'exploration de la Lune** (5 p); **la satellisation autour de la Terre** (4 p); stage mini-fusées (2 p); calendrier (1 p).

N° 9 (3^e et 4^e trimestres 1976, 12 pages) : **les satellites de télécommunications** (4 p); **le ballon, outil d'investigation spatiale** (4 p); instituteurs en stage (1 p); campagnes 1976 de La Courtine (1 p); à la découverte de Mars (1 p); calendrier (1 p).

N° 10 (1^{er} trimestre 1977, 16 pages) : **l'étude du Soleil** (6 p); **l'énergie solaire** (4 p); les actions régionales et la jeunesse (1 p); lancement d'Axor III (1 p); bilan de l'année 1976 (1 p); profil de l'année 1977 (1 p); calendrier (1 p); etc.

N° 11 (2^e trimestre 1977, 16 pages) : **la météorologie spatiale** (6 p); **conception et réalisation d'un satellite artificiel** (4 p); initiation à l'astronomie (2 p); SPOT, GEOS, Viking, ... (1 p); calendrier (2 p); etc.

N° 12 (3^e et 4^e trimestres 1977, 16 pages) : **l'étude des planètes** (9 p); **les trajectoires des sondes spatiales** (4 p); science dans la ville/La Courtine 1977 (1 p); Signe-3, Météosat, Voyager, ... (1 p); calendrier (1 p).

N° 13 (1^{er} et 2^e trimestres 1978, 16 pages) : **l'expérimentation spatiale en ballon** (6 p); **comment dialoguer avec un véhicule spatial ?** (4 p); une expérience pédagogique « micro-propulseur » (2 p); bilan de l'année 1977 (1 p); 96 jours dans l'espace (1 p); calendrier (1 p); etc.

N° 14 (3^e et 4^e trimestres 1978, 16 pages) : **l'astronomie spatiale** (9 p); **le GEPAN et l'étude du phénomène OVNI** (4 p); Odisea, l'étude de la magnétosphère... (2 p); calendrier (1 p).

N° 15 (1^{er} trimestre 1979, 24 pages) : **l'Homme dans l'espace** (14 p); La Courtine 1978 (1 p); bilan de l'année 1978 (2 p); calendrier (3 p); etc.

N° 16 (octobre 1979, 24 pages) : **la localisation et la collecte d'informations par satellite** (7 p); **les satellites géostationnaires** (6 p); Télécom-1, la mission Voyager, ... (3 p); le CAT ?/La Courtine 1979 (1 p); calendrier (3 p); etc.

N° 17 (avril 1980, 28 pages) : **le lanceur Ariane** (17 p); index des numéros parus de 1976 à 1979 (n^{os} 7 à 16) (4 p); bilan de l'année 1979 (4 p); calendrier (3 p).

N° 18 (novembre 1980, 28 pages) : **l'étude spatiale du magnétisme terrestre** (19 p); cosmonautes français, TV directe, Ariane, ... (7 p); calendrier (2 p).

N° 19 (mai 1981, 28 pages) : **télécommunications et satellites** (16 p); bilan de l'année 1980 (8 p); calendrier (2 p); etc.

N° 20 (octobre 1981, 28 pages) : **les satellites héliosynchrones** (19 p); Solaris, Ariane, la Navette, etc. (7 p); calendrier (2 p).

N° 21 (février 1982, 28 pages) : **vingt ans d'aventure spatiale française** (19 p); prospective, Arcad-3, Voyager, etc. (7 p); calendrier (2 p).

N° 22 (juin 1982, 32 pages) : **les véhicules spatiaux réutilisables** (25 p); nouveaux programmes européens, Vénus, etc. (5 p); calendrier (2 p).

N° 23 (octobre 1982, 24 pages) : **les apports de la télédétection spatiale** (13 p); rencontres 81 au Palais de la découverte (3 p); le spationaute français, Ariane, la Navette, etc. (6 p); calendrier (2 p).

N° 24 (février 1983, 28 pages) : **les premiers ballons libres** (16 p); pèlemèle (2 p); Ariane, Saliout-7, Landsat-4, ... (8 p); calendrier (2 p).

Tous ces numéros sont disponibles auprès de la CIMM, 28 bis, boulevard du Docteur-Aribat, 81100 Castres. Prix de vente unitaire : 6 F pour la France et 8 F pour l'étranger (tarif valable jusqu'au 31 mai 1984).

- 9 - Lancement (Shuang Cheng Tse) par une fusée chinoise (FB-1/CSL-2) du douzième satellite chinois **Chine-12** (172/393 km - 63° - 90 mn) peut-être pour une mission de reconnaissance. Partiellement récupéré le 14. [1982-90A]
- 10 - Échec du lancement du cinquième exemplaire d'**Ariane** qui devait placer sur orbite les satellites européens Marecs-2 et SIRIO-2 (voir EI, n° 23, p. 20 et n° 24, p. 20).
- 15 - Lancement (Plesetsk) de **Cosmos-1407** (181/364 km - 67,2° - 89,7 mn) peut-être pour une mission de reconnaissance/surveillance militaire. Récupéré ou rentré dans l'atmosphère un mois plus tard. [1982-91A]
- 16 - Lancement (Plesetsk) de **Cosmos-1408** (645/679 km - 82,5° - 97,8 mn) sans doute pour l'écoute électronique. [1982-92A]
- Lancement (Baïkonour) d'un nouveau satellite géostationnaire (99° Est, Stationar T) de la série **Ekran** (Ekran-9?). [1982-93A]
- 18 - Lancement (Baïkonour) du véhicule automatique de ravitaillement **Progress-15** (190/230 km - 51,6° - 89 mn), d'une masse d'environ 7 tonnes, qui rejoint Saliout-7 deux jours plus tard (voir EI, n° 24, p. 23). Il est décroché un mois plus tard et détruit peu après. [1982-94A]
- 22 - Lancement (Plesetsk) de **Cosmos-1409** (613/39 340 km - 63,8° - 11 h 49 mn) peut-être pour l'alerte précoce. [1982-95A]
- 24 - Lancement (Plesetsk) de **Cosmos-1410** (1 500/1 200 km - 82,6° - 116 mn) peut-être pour la géodésie. [1982-96A]
- 28 - Lancement (Cap Canaveral) par une fusée Atlas Centaur du cinquième satellite géostationnaire (63° Est, au-dessus de l'océan Indien) de la série **Intelsat-5** pour les télécommunications internationales.
- Comme les précédents Intelsat-5, il a une capacité de 12 000 communications téléphoniques et de deux canaux de télévision couleurs; par contre il est le premier à être muni d'un équipement en bande L pour le relais des communications maritimes d'Inmarsat qui compte actuellement 37 pays membres.

Son coût (lancement compris) serait de 87 millions de dollars. Il est construit par Ford Aerospace. [1982-97A]

- 30 - Lancement (Plesetsk) de **Cosmos-1411** (208/384 km - 72,9° - 90,1 mn) peut-être pour la reconnaissance photographique militaire. Récupéré 14 jours plus tard. [1982-98A]

Octobre 1982

- 2 - Lancement (Baïkonour) de **Cosmos-1412** (225/280 km - 65° - 89,6 mn) peut être pour la surveillance océanique. Ce satellite serait équipé d'un radar alimenté par un générateur nucléaire. [1982-99A]

- 12 (ou 13 ?) - Lancement (Baïkonour) par une même fusée de trois satellites, **Cosmos-1413**, **1414** et **1415** (circulaire, 19 100 km - 64,8° - 11 h 13 mn).

Il pourrait s'agir des premiers exemplaires d'un système mondial de navigation (nommé *Glonass*: GLObal NAvigation Satellite System) comprenant de 9 à 12 satellites à défilement répartis dans trois ou quatre plans différents. La revue *Snias Informations Espace* (n° 299, novembre 1982, p. 17) ajoute à ce sujet :

Selon les Soviétiques, ces trois satellites sont destinés à « améliorer les composants des systèmes spatiaux de navigation mis au point pour la localisation des avions civils et des navires de commerce de l'Union soviétique » (...)

Similaire au programme américain Navstar, ce système devrait pouvoir permettre, comme ce dernier, d'améliorer la précision des missiles stratégiques ou tactiques. Il fonctionne dans les bandes de fréquences de 1 240-1 260 MHz, 1 597-1 610 MHz et 1 610-1 617 MHz, avec des transmissions dans deux fréquences différentes pour compenser les erreurs de distorsion ionosphérique. [1982-100A, D et E]

- 14 - Lancement (Baïkonour) de **Cosmos-1416** (226/272 km - 70,4° - 89,5 mn) peut-être pour la reconnaissance photographique militaire. Récupéré 14 jours plus tard. [1982-101A]

- 19 - Lancement (Plesetsk) de **Cosmos-1417** (978/1 023 km - 83° - 104,9 mn) peut-être pour la navigation militaire. [1982-102A]

- 20 - Lancement (Baïkonour) du sixième satellite géostationnaire de la série **Gorizont**, **Gorizont-6**, pour les télécommunications. [1982-103A]

- 21 - Lancement (Kapustin Yar) de **Cosmos-1418** (370/414 km - 50,6° - 92,3 mn) peut-être pour une mission de calibration radar. [1982-104A]

- 28 - Lancement (Cap Canaveral) du cinquième satellite géostationnaire de la série **Satcom**, **Satcom-5**. Placé par 143° de longitude Ouest, il doit servir aux télécommunications de l'Alaska (trafic intérieur et liaisons avec les autres états des États-Unis).

Satcom-5 a une masse au lancement de 1,07 t et une durée de vie théorique de 10 ans. Il est équipé de 24 canaux fonctionnant dans la bande C, chaque canal permettant d'acheminer 1 500 communications téléphoniques ou un programme TV couleurs. Par rapport aux autres Satcom, il bénéficie de certaines améliorations, en particulier la présence d'amplificateurs de puissance à semi-conducteurs au lieu des classiques tubes à ondes progressives. La capacité du satellite en est accrue mais aussi sa fiabilité : la probabilité de bon fonctionnement de 22 des 24 canaux, au moins, pendant huit années ou plus, passe ainsi de 60 à 90 %. [1982-105A]

- 30 - Lancement (Cap Canaveral) par l'armée de l'Air de deux satellites géostationnaires pour les télécommunications militaires, le quinzième et dernier exemplaire de la série **DSCS-2** et le premier exemplaire de la série **DSCS-3**. Celui-ci a une masse de 1 040 kg (contre 590 pour les DSCS-2) et une durée de vie théorique de 10 ans (au lieu de 5 pour DSCS-2).

Ces deux satellites ont été placés sur orbite à l'aide du premier exemplaire de la fusée Titan 34D, construite par Martin Marietta, dont la masse est de 680 t et la poussée initiale de 11 650 kN. Pour la première fois, également, était utilisé l'étage supérieur IUS, construit par Boeing, qui doit aussi servir sur la Navette (voir EI, n° 22, p. 7). [1982-106A et B]

Espace Information est une publication périodique (paraissant trois fois par an) que réalise le département Publications du Centre spatial de Toulouse du CNES.

Tarif de l'abonnement (souscrit obligatoirement pour deux ans, soit pour six numéros) : 75 F pour la France, 90 F pour l'étranger (envoi par avion). Tarif valable jusqu'au 31 mai 1987.

Toute demande d'abonnement est à adresser à : CIMM — Espace Information 15, rue des Pénitents blancs, 31000 Toulouse.

Téléphone : 61 21 52 36. Joindre le titre de paiement (CCP, chèque bancaire, mandat international,...) libellé à l'ordre de CIMM Informatique. Exemplaire gratuit sur simple demande. Les anciens numéros d'Espace Information et des reliures sont en vente à la même adresse.

Pour toute autre correspondance écrire au département Publications du Centre spatial de Toulouse, 18, avenue Édouard-Belin, 31055 Toulouse Cedex. Téléphone : 61 27 31 31.

Les articles et les schémas d'Espace Information ne peuvent être reproduits sans autorisation préalable du département Publications.