

Les mouvements de la Terre

Primaire et collège

Résumé

« *Eppur si muove* », aurait dit Galilée en 1633 : « et pourtant, elle bouge ! » Le savant italien, qui venait d'abjurer devant l'Inquisition la doctrine du mouvement de la Terre, a-t-il vraiment prononcé ces mots ? Peu importe : voilà la Terre, qui semble si ferme sous nos pieds, à tout jamais lancée dans l'Univers, emportée par un mouvement complexe et vertigineusement rapide.

les mouvements de la Terre

Fabienne Casoli

« *Eppur si muove* », aurait dit Galilée en 1633 : et pourtant, elle bouge ! Le savant italien, qui venait d'abjurer devant l'Inquisition la doctrine du mouvement de la Terre, a-t-il vraiment prononcé ces mots ? Peu importe : voilà la Terre, qui semble si ferme sous nos pieds, à tout jamais lancée dans l'Univers, emportée par un mouvement complexe et vertigineusement rapide. Car la Terre ne se contente pas de tourner sur elle-même en 24 heures (à peu près...) ; son mouvement de RÉVOLUTION l'emmène aussi autour du Soleil en 365 jours un quart (à peu près...). Sa trajectoire a la forme d'un cercle un peu aplati, qu'elle parcourt à la vitesse fort respectable de 108 000 km/h ; une vitesse que l'on peut calculer facilement en sachant que le rayon de ce cercle est de 150 millions de kilomètres, et le temps de trajet de 365 jours un quart. À cette vitesse, comment se fait-il que nous n'ayons pas le tournis ?

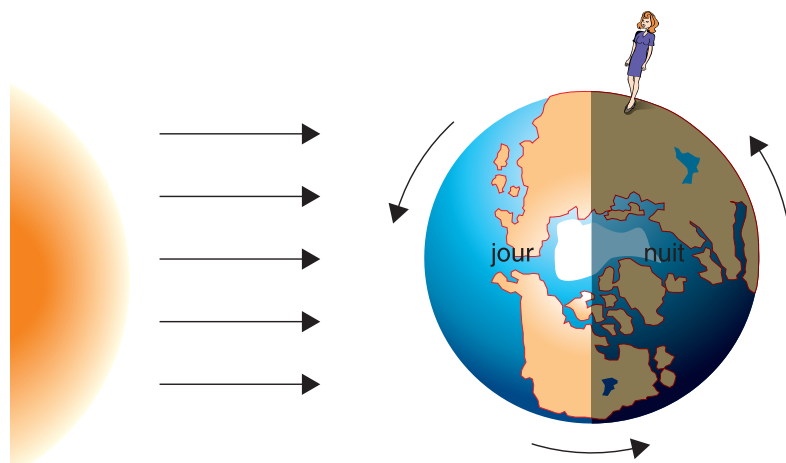
Nous allons faire le tour... de la question. Ces mouvements de la Terre, quels sont-ils, et quelles sont leurs conséquences ? Nous commencerons par le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même, le mouvement *diurne*, qui produit l'alternance des jours et des nuits : un phénomène que nous pensons bien connaître, mais qui réserve quelques surprises. Puis nous nous pencherons sur le mouvement de la Terre autour du Soleil,

qu'on appelle « révolution » ou « mouvement » annuel. Celui-là est responsable de la succession des saisons. Enfin, il sera temps d'essayer de comprendre pourquoi il a fallu si longtemps pour admettre que ce n'est pas l'Univers tout entier qui se déplace autour de la Terre, mais bel et bien la Terre qui tourne, à la fois sur elle-même et autour du Soleil. Sans parler du mouvement du Soleil et de toutes les planètes autour du centre de la Voie lactée, mais ceci est une autre histoire...

La Terre tourne sur elle-même

Le jour et la nuit. Depuis Galilée, et Copernic avant lui, premier astronome moderne à avoir défendu cette idée, tout le monde est d'accord : la Terre tourne sur elle-même par rapport au Soleil et aux étoiles. Ce mouvement produit l'alternance des jours et des nuits. Une moitié de la Terre est éclairée par le Soleil, il y fait jour ; l'autre moitié n'est pas éclairée, il y fait nuit. Et comme la Terre tourne autour de l'axe des pôles, un point donné de la surface terrestre passe successivement de la lumière à l'ombre (figure ci-contre, en haut).

Comment faire coïncider cette idée avec notre expérience quotidienne ? Voyons ce qui se passe un jour d'été, à la latitude de



La succession des jours et des nuits, représentée ici au moment d'un équinoxe, d'automne ou de printemps. La Terre tourne dans le sens de la flèche (sens inverse des aiguilles d'une montre), et le personnage va voir le Soleil se lever à l'est. Cette représentation vous semble bizarre ? C'est la Terre « vue de dessus », depuis le pôle Nord. La représentation de la Terre « vue de côté » est tellement ancrée dans notre esprit que nous avons beaucoup de mal à nous imaginer la Terre vue autrement.

Paris. Au lever du Soleil, dans la direction du nord-est, l'ombre d'un bâton vertical est longue et dirigée à l'opposé du Soleil, vers le sud-ouest. Le Soleil monte dans le ciel, les ombres raccourcissent et passent au nord. Quand le Soleil passe exactement dans la direction du sud, il est au plus haut de sa course au-dessus de l'horizon – il passe au MÉRIDIEN. L'ombre est la plus courte de la journée et pointe le nord : il est midi au soleil. Le Soleil redescend pour se coucher au nord-ouest, et l'ombre

s'allonge tout en s'orientant vers le sud-est (utiliser « orienter » ici est un peu abusif, car, étymologiquement, orient signifie lever et occident coucher...).

Faisons donc une expérience pour mieux y réfléchir. Il nous faut un globe terrestre et un petit personnage, que nous appellerons Mme X, dont les pieds sont munis d'un adhésif double face. Une lampe allumée placée à hauteur du centre de la Terre figure le Soleil.

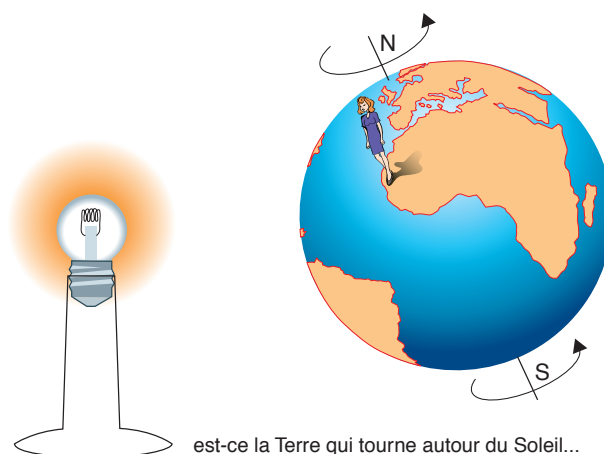


Première expérience

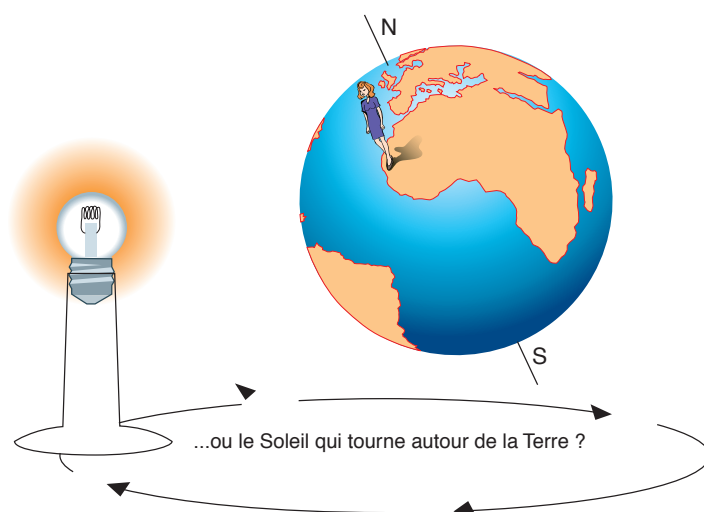
- On place le globe à quelques mètres du Soleil, et Mme X est collée sur l'Afrique, au sud du Maroc (par exemple). Pour que ce soit l'été pour elle, il faut diriger le pôle Nord un peu vers le Soleil : quand la Terre tourne, le pôle est perpétuellement éclairé. Faisons maintenant tourner la Terre. Mais au fait, dans quel sens ? Dans le sens inverse des aiguilles d'une montre si on la regarde d'« au-dessus » du pôle Nord, comme sur la figure page suivante, en haut, car Mme X doit voir le Soleil se lever vers l'est. C'est donc le lever du Soleil pour Mme X. Regardons son ombre : au départ très longue et dirigée sud-ouest, elle raccourcit en passant au nord puis s'allonge à nouveau dans la direction nord-est. C'est bien ce que nous voyons dans le ciel au début de l'été.

Deuxième expérience

- Faisons tourner le Soleil sur un cercle autour de la Terre fixe. L'ombre de Mme X passe exactement par la même succession de phases ! Dans la première expérience, nous nous sommes placés dans un système HÉLIOCENTRIQUE (centré sur le Soleil), où la rotation de la Terre était cause de la succession des jours et des nuits. Ici, nous sommes dans un système GÉOCENTRIQUE (centré sur la Terre), où jour et nuit sont dus au mouvement du Soleil autour de la Terre. Du point de vue de la course du Soleil dans le ciel et de la forme des ombres, ces deux descriptions sont donc équivalentes. Qu'en est-il si nous nous intéressons au



est-ce la Terre qui tourne autour du Soleil...



...ou le Soleil qui tourne autour de la Terre ?

trajet des étoiles et des planètes dans le ciel nocturne ? Elles aussi se lèvent dans la direction de l'est, et se couchent dans la direction de l'ouest. De l'observation de ce mouvement, on peut conclure soit qu'étoiles et planètes tournent autour de la Terre, soit que la Terre tourne sur elle-même.

Rien ne s'oppose à ce que ce soit la Terre qui tourne sur elle-même, mais rien ne le prouve non plus.

Troublant, n'est-ce pas ? Et les *preuves* de la rotation de la Terre, où sont-elles donc ? Patience, nous allons y revenir. Pour l'instant, plongeons-nous dans les complexités de ce mouvement en apparence tout simple : la rotation de la Terre autour de l'axe des pôles.

Où les journées ne durent pas 24 heures

Choisissons donc le point de vue selon lequel la Terre tourne sur elle-même. Tourne par

rapport à quoi ? Au Soleil, certes. Aux étoiles, d'accord. Mais ce n'est pas tout à fait la même chose...

Mme X part faire du tourisme sur une des planètes de Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche de nous. Avec nostalgie, elle jette un coup d'œil sur sa ville natale, Brest, chaque fois qu'elle passe devant lui, emportée par la rotation de la Terre. Ça alors ! Elle constate qu'elle voit cette ville, non pas toutes les 24 heures, mais toutes les 23 heures, 56 minutes et 4 secondes !



Pour cette expérience, il va nous falloir le matériel de la figure de la page 26 : lampe et globe terrestre, ainsi que deux personnes, appelons-les Terra et Stella. Ici, la lampe n'a pas besoin d'être allumée. Terra tient le globe terrestre et tourne autour de la lampe Soleil, tout en tournant sur elle-même, dans le même sens. Pour lui éviter d'avoir le tournis, on va supposer que la Terre tourne autour du Soleil en quatre jours. Quand Terra a fait un tour complet sur elle-même par rapport au Soleil, elle doit donc aussi avoir fait un quart de tour autour du Soleil.

Stella, sans bouger, observe la scène de l'extérieur. Pendant que Terra accomplit sa révolution autour du Soleil, elle compte combien de fois elle voit Brest. Elle s'aperçoit que, alors que quatre jours se sont écoulés, elle a vu passer la ville cinq fois ! En effet, à chaque jour, la Terre, vue de l'extérieur, a accompli un quart de tour supplémentaire...

Pour aller plus loin, une question : si nous revenons à l'expérience de Terra et Stella, que se passerait-il si la Terre tournait sur elle-même dans le sens opposé à celui de sa révolution autour du Soleil ? Stella aurait vu passer la ville de Brest trois fois. La durée du jour, selon elle, serait donc plus grande que 24 heures.

Quel rapport avec les 23 heures 56 minutes de tout à l'heure ? Eh bien, imaginons maintenant Stella qui regarde la vraie Terre tourner autour du Soleil. En un an, la Terre aura tourné 365 fois un quart sur elle-même ; mais elle aura aussi fait un tour autour du Soleil. Stella aura donc vu passer 366 fois un quart la ville de Brest... Pour notre observatrice stellaire, la Terre fait donc un tour complet sur elle-même en $24 \text{ heures} \times (365,15/366,15) = 23 \text{ heures}, 56 \text{ minutes et } 4 \text{ secondes} !$

Si le père de Stella, qui est resté sur Terre, voulait saluer sa fille chaque fois qu'il la voyait passer dans le ciel, il devrait aussi le faire toutes les 23 heures, 56 minutes et 4 secondes. Cet intervalle est effectivement celui qui sépare deux passages d'une étoile au méridien (c'est-à-dire, comme pour le Soleil, quand elle est au plus haut de sa course dans le ciel. Selon les cas, l'étoile est alors dans la direction exacte soit du sud, soit du nord). On l'appelle JOUR SIDÉRAL, du mot latin qui signifie étoile.

Les astronomes utilisent ainsi, à côté du temps civil, le temps sidéral qui leur permet de connaître la position des astres dans le ciel. La durée de 24 heures qui comprend le jour et la nuit, dont le nom savant est « nycthémère » mais que nous appelons

« jour » est en fait le *jour solaire*, la durée moyenne entre deux passages du Soleil au méridien.

Conclusion : la durée de la rotation de la Terre sur elle-même dépend du point que nous prenons comme référence : Soleil ou étoiles, ça n'est pas pareil.

Où les jours s'allongent

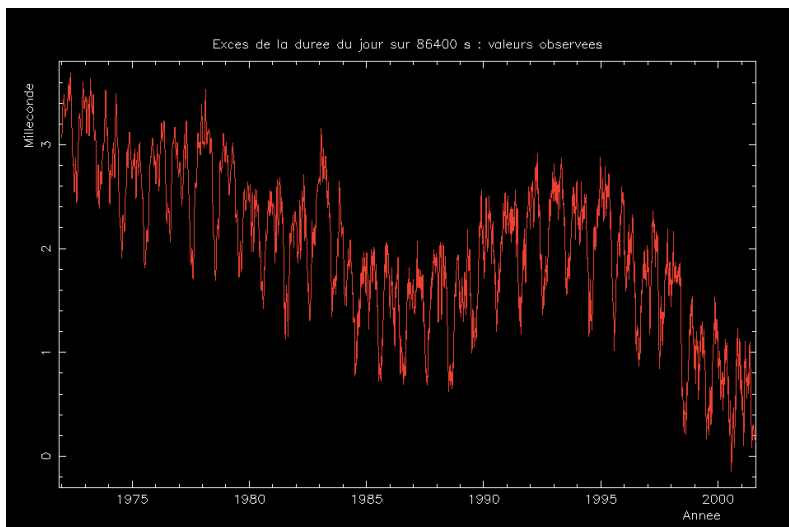
Nous sommes d'accord, la Terre met 24 heures à faire un tour complet sur elle-même par rapport au Soleil, soit 86 400 secondes. Mais ça, c'est une moyenne. En fait, la durée du jour solaire peut varier de plus d'une milliseconde en plus ou en moins, ainsi que le montre le diagramme page précédente. Une petite milliseconde, est-ce bien grave ? Oui, quand on pense que la Terre a une masse de six milliards de milliards de milliards de tonnes : il lui faut de bonnes raisons pour accélérer ou pour ralentir ! Les bonnes raisons, ce sont des courants saisonniers dans l'atmosphère ou dans les océans, qui donnent ces variations régulières à l'échelle d'un an, ou bien des mouvements du magma sous l'écorce terrestre ou des séismes, plus imprévisibles, ou encore des phénomènes météorologiques de grande ampleur comme le fameux El Niño. En effet, les mouvements de l'atmosphère et des océans changent la

répartition de la matière terrestre, ce qui accélère ou ralentit la rotation de la Terre, exactement de la même manière qu'un patineur peut ralentir ou accélérer en étendant ou en croisant les bras.

Le phénomène est bien connu, même s'il n'est pas entièrement prévisible. La rotation de la Terre est si irrégulière que depuis 1958, on ne s'en sert plus pour définir l'unité de temps, qui est comme chacun sait la seconde. La seconde est définie comme

« la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 » (13^e Conférence générale des Poids et Mesures, 1967). Le temps est dorénavant un temps *atomique* et non plus un temps astronomique, et les horloges officielles sont des horloges atomiques dans lesquelles les vibrations des atomes de césium (pour les plus perfectionnées) ou de rubidium (un peu moins cher) égrènent les fractions de seconde avec une régularité sans pareille. Ce qui permet de mesurer les irrégularités de la rotation de la Terre.

Encore plus surprenant : la Terre tourne sur elle-même de moins en moins vite. Les mesures montrent que chaque siècle, le jour s'allonge de 1,6 milliseconde ; à nouveau, cela se mesure facilement. On dispose aussi d'archives fossiles, par exemple des comptages de courbes de croissance de coraux, qui le montrent. Les scientifiques ont calculé que quand la Terre s'est formée,



Variations de la durée du jour par rapport à 86 400 secondes, entre 1972 et 2001. L'échelle est donnée en millisecondes. La plupart des records en athlétisme sont donnés avec cette précision d'une milliseconde : c'est donc une quantité facile à mesurer. Le saut d'une milliseconde que l'on détecte entre 1982 et 1983 correspond au phénomène météorologique d'El Niño.

il y a quatre milliards et demi d'années, le jour durait environ six heures.

Si la Terre ralentit sa course, c'est que la Lune la freine. On le sait, la force d'attraction gravitationnelle de la Lune provoque le phénomène des marées : non seulement les marées océaniques que nous connaissons bien, mais aussi des marées terrestres. Deux fois par jour, les océans se soulèvent, et la croûte terrestre se déforme de quelques centimètres. On peut mesurer cette déformation de la croûte avec des instruments de positionnement du type GPS, *Global Positioning System*, comme en ont beaucoup de voitures maintenant.

Tout ce remue-ménage, mouvements des océans, déformations de la roche, nécessite de l'énergie, énergie qui est prise à l'énergie de rotation de la Terre. En conséquence, la Terre tourne de moins en moins vite.

Même cause, autre effet : la Terre et la Lune s'éloignent l'une de l'autre. La distance qui nous sépare de notre satellite est mesurée quotidiennement par des tirs de laser sur des

réflecteurs placés à la surface de la Lune par les astronautes des missions *Apollo*. On observe ainsi que la distance Terre-Lune (384 398 kilomètres) augmente de presque 4 centimètres par an.

Mais comment cela va-t-il finir ? La Terre finira par toujours montrer la même face à la Lune. C'est déjà le cas pour la Lune, qui nous montre toujours la même face : dans quelques dizaines de milliards d'années, Terre et Lune se regarderont en chiens de faïence, ou plutôt danseront une valse les yeux dans les yeux tout en tournant autour du Soleil... Le « jour » durera alors 47 jours !

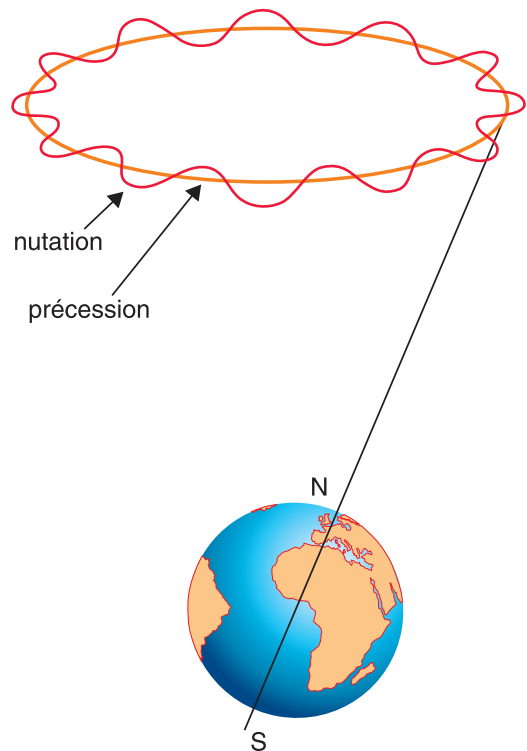
Une des conséquences du ralentissement de la Terre est que l'échelle de temps atomique (TA) donnée par les horloges (atomiques) ne correspond pas parfaitement au temps « terrestre », le temps universel (TU), qui est celui de la rotation de la Terre (le TU correspond à notre temps civil moins une heure en hiver, moins deux heures en été). Le jour solaire moyen valait bien 86 400 secondes, mais c'était vers 1820. Mais, puisque la Terre ralentit, ce jour solaire moyen de 1840 est trop court pour nous de deux millisecondes ! Cela ne semble pas très grave, mais l'effet est cumulatif : la durée d'une année est actuellement trop courte de presque une seconde ($365 \text{ jours} \times 2 \text{ millisecondes}$). Alors, pour éviter un décalage, le « Service international de la rotation terrestre » (car il y a un organisme spécial qui surveille la rotation de cette bonne vieille Terre) intercale de temps en temps une seconde de plus dans l'échelle du temps universel. Ça a été le cas le 31 décembre 2008.

La toupie Terre

Résumons : la Terre tourne sur elle-même, par rapport au Soleil et par rapport aux étoiles, et pas toujours très rond. Elle tourne

autour de l'axe des pôles, bien sûr, qui côté nord pointe à peu près dans la direction de l'ÉTOILE POLAIRE. Dans l'hémisphère Sud : il n'y a pas d'étoile visible à l'œil nu à proximité du pôle céleste Sud. Il faut aller à plus de vingt degrés pour trouver une petite constellation en forme de croix, la Croix du Sud, dont la branche la plus longue indique assez bien la direction du sud.

Ce mouvement de rotation de la Terre rappelle celui d'une toupie. Une très grosse toupie dont l'axe de rotation ne serait pas perpendiculaire à son support, mais incliné de $23^\circ 27'$ (environ un quart d'angle droit). Il est vrai qu'une toupie tourne rarement « droit »... De plus, en tournant, l'axe d'une toupie pointe une direction qui décrit lentement un cône : c'est le mouvement de PRÉCESSION. Ainsi, au cours des âges, l'axe de rotation de la Terre ne pointe pas toujours la même direction du ciel : la direction du pôle Nord décrit en 26 000 ans un cercle



dans le ciel (cf. la figure en bas de la page 29). À l'époque de la construction de la pyramide de Kheops, l'étoile qui se trouvait dans la direction du pôle Nord était l'étoile Alpha de la constellation du Dragon, et dans 12 000 ans, l'étoile brillante la plus proche du pôle Nord sera Véga.

Pour une toupie, se superpose au mouvement de précession un autre plus rapide, une sorte de frémissement autour du cône de précession : la NUTATION. On l'observe également pour la Terre : il se traduit par une petite ondulation tous les dix-huit ans de la direction des pôles, qui se remarque si l'on observe très précisément la position des étoiles dans le ciel sur de longues périodes de temps (et cela, les astronomes le font depuis plusieurs milliers d'années).

Si la Terre était parfaitement ronde, aucun de ces phénomènes ne se produirait. Mais la Terre est une sphère un peu aplatie. L'effet de l'attraction lunaire et solaire sur le « bourrelet » autour de l'équateur, les forces, qui se contrarient parfois, de la Lune et du Soleil, voire des autres planètes : il n'en faut pas plus pour que la Terre tourne... comme une toupie. Mais pas si follement que cela : précession et nutation sont parfaitement calculables.

La Terre tourne autour du Soleil

La ronde des saisons

Non contente de tourner sur elle-même comme une folle toupie, notre Terre tourne autour du Soleil. Heureusement, sinon il n'y aurait pas de saisons. Ce n'est pas la seule raison au phénomène des saisons : il faut aussi que l'axe de rotation soit incliné par rapport à l'ÉCLIPTIQUE (le plan de l'ORBITE de la Terre autour du Soleil).

Reprenons l'expérience de la page 25 pour nous en convaincre. Nous en étions restés à l'été. Il est temps maintenant de passer à l'automne : pour cela, la Terre accomplit un quart de tour autour du Soleil, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Mais attention ! Le pôle Nord doit toujours pointer vers... le nord ! Une fois la Terre dans cette position, il est facile de voir en la faisant tourner sur elle-même que les jours et les nuits sont devenus d'égale durée. Quant à notre Mme X du début, elle constate que le Soleil se lève plein est et se couche plein ouest. C'est l'équinoxe d'automne, et partout sur Terre la durée du jour est égale à la durée de la nuit. Au lecteur de trouver ce qui se passe pour l'hiver et le printemps...

Pour aller plus loin dans les conséquences observables du mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil, il nous faut parler des lois de Kepler (Johannes Kepler était un astronome allemand qui vécut de 1571 à 1630). Ces lois, au nombre de trois, décrivent les mouvements des planètes autour du Soleil, mais aussi des satellites artificiels autour de la Terre et des satellites naturels autour des planètes (la Lune autour de la Terre, par exemple).

La première loi de Kepler dit que la trajectoire (l'orbite) de la Terre est une ellipse dont le Soleil occupe l'un des foyers.

L'orbite terrestre n'est pas une ellipse très aplatie puisqu'elle ne diffère d'un cercle parfait que de quelques pour-cent. Le point le plus éloigné du Soleil s'appelle l'APHÉLIE (le 5 juillet) ; et la Terre est au plus près du Soleil au PÉRIHÉLIE, le 3 janvier. S'il fait froid en hiver dans l'hémisphère Nord, ce n'est pas parce que le Soleil est plus loin de nous – il est en fait plus près –, mais parce que ses rayons parviennent plus inclinés sur le sol de la Terre et la chauffent moins efficacement

(et moins longtemps, puisque le jour est plus court !). (Ce sujet sera développé par Jean-Louis Dufresne aux pages 106-121.)

Nous n'allons pas énoncer en détail la deuxième loi de Kepler, qui décrit la manière dont varie la vitesse de la Terre sur son orbite elliptique. Il nous suffit de savoir que quand la Terre est au plus près du Soleil (au périhélie, donc), elle va plus vite, alors que quand elle est loin du Soleil, elle va moins vite (sa vitesse moyenne est quand même de 108 000 km/h !). Et nous oublierons pour cette fois la troisième loi de Kepler.

Orbite elliptique, vitesse variable... Tout cela ne devrait nous faire ni chaud ni froid. Et pourtant, les conséquences des lois de Kepler sont aisément visibles. Prenons en exemple la durée des saisons. Chaque saison occupe un quart exactement de l'orbite terrestre, mais ce quart d'orbite ne va pas être parcouru en un quart d'année exactement. Prenez le calendrier aimablement fourni par votre postier au moment des étrennes : il indique non seulement le jour d'entrée dans chaque saison, mais encore son heure. Combien y a-t-il de jours dans chaque saison ?

Réponse :

92 jours 19 heures pour le printemps,
93 jours 14 heures pour l'été,
89 jours 19 heures pour l'automne,
et 89 jours pour l'hiver.

L'été est donc la plus longue de toutes les saisons. Normal puisque c'est le moment où la Terre se déplace le plus lentement. Bien

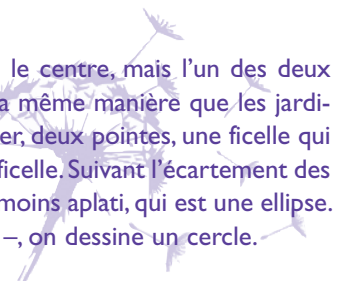
sûr, c'est l'inverse dans l'hémisphère Sud, où l'hiver est la plus longue des saisons !

Autre illustration des lois de Kepler : le décalage entre midi solaire et midi TU. Un cadran solaire indique le midi solaire, ou le midi vrai : le moment où le Soleil est le plus haut dans le ciel et exactement dans la direction du sud (pour l'hémisphère Nord...). Nos montres, elles, indiquent le temps civil (le « temps » pour les astronomes, c'est l'heure pour le commun des mortels). On sait qu'il faut enlever une heure en hiver et deux heures en été pour retrouver le temps universel. Même ainsi, il existe un décalage sensible avec le midi solaire. Le lecteur averti répondra que le temps universel est celui de Greenwich, à l'origine des longitudes ; Paris étant à $2^{\circ} 20'$ de longitude est, le midi solaire à Paris se produit 9 minutes 20 secondes avant le midi solaire à Greenwich (si un tour complet de la Terre, soit 360° , correspond à 24 heures de décalage, combien valent $2^{\circ} 20'$?). Ça va dans le bon sens, mais il reste une différence qui peut atteindre dix minutes. Une bonne partie de ce décalage vient du fait que le temps universel est un temps moyen : pour cette échelle de temps, en 24 heures la Terre est censée avoir parcouru toujours la même fraction de son orbite, ce qui n'est pas le cas puisque sa vitesse varie (l'autre raison du décalage entre temps universel et temps solaire est que le temps universel suppose que le Soleil est toujours dans le plan de



Construction d'une ellipse

- Les orbites des planètes sont des ellipses dont le Soleil occupe, non pas le centre, mais l'un des deux foyers. On peut visualiser ces deux foyers en construisant une ellipse de la même manière que les jardiniers dessinent des parterres de fleurs. Il faut, pour cela, une feuille de papier, deux pointes, une ficelle qui les encercle et un crayon que l'on fait glisser le long du bord intérieur de la ficelle. Suivant l'écartement des pointes (les foyers) et la longueur de la ficelle, on obtient un ovale plus ou moins aplati, qui est une ellipse.
- Quand les deux foyers sont confondus – il n'y a alors qu'une seule pointe –, on dessine un cercle.



l'équateur terrestre, ce qui n'est vrai qu'aux ÉQUINOXES).

La différence entre l'heure donnée par le cadran solaire et l'heure donnée par nos montres s'appelle *équation du temps*. Sur certains cadrans solaires, cette correction est donnée par une courbe en forme de 8 asymétrique, graduée en dates : l'*analemne*.

Les variations du climat

La trajectoire de la Terre autour du Soleil, sa rotation autour de l'axe des pôles : du solide, tout cela ! Pourtant ces deux mouvements de la Terre sont perturbés en permanence par la présence des autres planètes et de la Lune. Résultat : l'orbite de notre planète et son mouvement de rotation varient lentement mais sûrement au fil du temps.

Ces variations sont à l'origine des grandes variations du climat. Nous avons déjà rencontré la précession des équinoxes, ce balancement de l'axe des pôles suivant une échelle de temps de 26 000 ans, qui provoque une lente dérive des saisons.

Prenons par exemple le passage de la Terre au périhélie. Actuellement, il se produit pendant l'hiver de l'hémisphère Nord, c'est-à-dire quand le pôle Nord est dans la nuit perpétuelle. Les hivers de l'hémisphère Nord sont donc relativement doux, car la distance Terre-Soleil est minimale.

Dans 13 000 ans, l'axe des pôles pointera la direction opposée : les étés de l'hémisphère Nord seront donc plus chauds et les hivers plus froids.

La forme de l'orbite de la Terre varie elle aussi sur des échelles de temps de 100 000 ans : l'ellipse est plus ou moins aplatie. Enfin, l'inclinaison de l'axe des pôles n'est pas toujours de $23^{\circ} 27'$, mais change un peu tous les 41 000 ans.

La combinaison de tous ces phénomènes explique en partie les grandes périodes glaciaires qu'a connues notre planète. Imaginons par exemple qu'au moment de l'hiver dans l'hémisphère Nord, la Terre est au plus loin du Soleil, son orbite est très allongée et en plus l'inclinaison est maximale : l'hiver a toutes les chances d'être très froid ! L'hémisphère Nord, qui est celui qui porte le plus de continents, va développer une énorme calotte de glaces, et la Terre va entrer dans une ère glaciaire.

Toutes les planètes du système solaire sont soumises à ces variations climatiques. Dans le cas de la planète Mars, il est possible que les variations d'inclinaison de son axe aient été si grandes qu'à certaines périodes, l'atmosphère de Mars, déjà fort ténue, ait été entièrement gelée ! Les variations climatiques que la Terre a subies n'ont pas atteint une telle ampleur : la présence de la Lune aurait eu, semble-t-il, un effet stabilisant.

Ces modifications de l'orbite terrestre se produisent de façon régulière et prévisible : les astronomes peuvent nous annoncer que la prochaine période glaciaire devrait commencer d'ici 20 000 à 25 000 ans. Un peu trop loin pour qu'on espère compenser ainsi le changement climatique...

Et pourtant, elle tourne !

Les deux systèmes du monde

« Quelles grandes vraisemblances avez-vous pour vous figurer que le Soleil soit immobile, quand nous le voyons marcher ? et que la Terre tourne autour de son centre avec tant de rapidité, quand nous la sentons ferme par-dessous nous ? » dit un des personnages du roman de Cyrano de Bergerac *L'Autre Monde, ou Voyage dans les États et Empires*

de la Lune, publié en 1657. C'est vrai, rien dans l'expérience quotidienne ne permet de « prouver » que la Terre tourne par rapport aux étoiles et au Soleil, et pas le contraire. Pas étonnant qu'il ait fallu attendre le XVI^e siècle pour que le mouvement de la Terre soit sérieusement envisagé.

Laissons Fontenelle, dans ses *Entretiens sur la pluralité des mondes* (1686), nous raconter comment cela s'est passé : « Figurez-vous un Allemand nommé Copernic, qui fait main basse sur tous ces cercles différents, et sur tous ces cieux solides qui avaient été imaginés par l'Antiquité. Il détruit les uns, il met les autres en pièces. Saisi d'une noble fureur d'astronome, il prend la Terre et l'envoie bien loin du centre de l'Univers, où elle s'était placée, et dans ce centre il y met le Soleil, à qui cet honneur était bien mieux dû. Les planètes ne tournent plus autour de la Terre [...]. Tout tourne présentement autour du Soleil, la Terre y tourne elle-même. »

Nous avons donc, au début du XVII^e siècle, deux « systèmes du monde » : l'ancien, géocentrique, légué par l'astronome grec Ptolémée, et le nouveau, héliocentrique, celui de Copernic révisé par Kepler. Comment choisir entre les deux ? Quel est le vrai « système du monde » ? Qu'est-ce qui pourrait, contre les preuves évidentes du mouvement du Soleil que nous voyons tous les jours, nous faire admettre que la Terre tourne, et qu'elle se déplace autour du Soleil, puisque les deux mouvements sont étroitement liés ?

À l'époque de Galilée, il n'y avait aucune raison objective de choisir l'un ou l'autre système. Dans son livre, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (1632), Galilée montre qu'il n'est pas impossible que la Terre bouge, en réfutant un à un les arguments des tenants du système géocentrique. Par exemple,

disent ces derniers, si la Terre tournait, une pierre lancée en l'air devrait retomber à l'ouest du point où on l'a lancée, puisque pendant que la pierre était en l'air, la Terre a tourné en dessous. Et cela devrait se remarquer puisque en dix secondes, un point de l'équateur s'est déplacé de presque 5 kilomètres. En effet, en suivant la rotation de la Terre, un point à l'équateur se déplace en 24 heures d'une quantité égale à la circonférence terrestre : $2 \times \pi \times 6\,378 \text{ km}$. En dix secondes, il se déplace de cette quantité divisée par $24 \times 60 \times 6$. Pour contrer cet argument, Galilée utilise l'analogie avec un bateau en mouvement : une pierre qu'on laisse tomber du haut de son mât tombe au pied du mât, et pas à l'arrière du bateau. Imparable, mais certains ont quand même essayé de vérifier au moyen d'expériences un peu risquées : placer un canon à la verticale, lancer un boulet et vérifier qu'il retombait bien dans la gueule du canon !

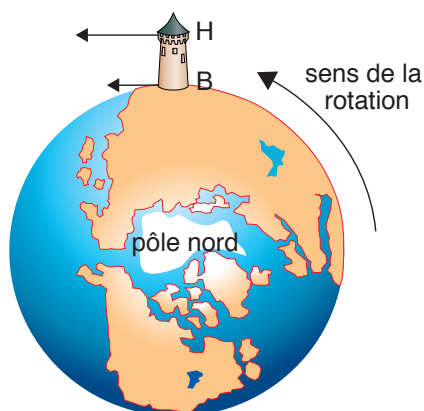
Même Galilée n'a pas pu *prouver* que la Terre tourne, sauf par analogie : on voit des satellites tourner autour de la planète Jupiter, mais cela ne prouve en rien que la Terre fasse de même autour du Soleil. D'ailleurs, Galilée ne disait-il pas lui-même qu'aucune expérience faite à bord d'un bateau dans une cabine fermée ne pourra jamais prouver que c'est bien le bateau qui bouge et pas la mer ?

La physique moderne est d'accord avec lui sur ce point. Dans un référentiel en mouvement rectiligne *uniforme* par rapport à un autre référentiel (traduction : si on est dans un repère qui bouge en ligne droite et à vitesse constante par rapport à un autre repère), aucune expérience ne permet de savoir que le référentiel est en mouvement. Tout le monde sera d'accord avec la physique là-dessus : quand je suis dans un train à quai, comment dire si c'est mon train qui part ou bien celui qui est sur la voie d'à côté ?

« Avez-vous vu tourner la Terre ? »

Mais la Terre ne se déplace pas en ligne droite : elle tourne, sur elle-même et autour du Soleil. Cela fait une grande différence. Alors que tous les référentiels en mouvement rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre sont indiscernables, il n'en est pas de même pour les mouvements accélérés en général et le mouvement de rotation en particulier. Il existe bel et bien un certain nombre de conséquences de la rotation de la Terre que l'on peut vérifier expérimentalement. L'une est difficile à vérifier : c'est la déviation vers l'est de la chute libre d'un corps ; l'autre est beaucoup plus spectaculaire : c'est le pendule de Foucault.

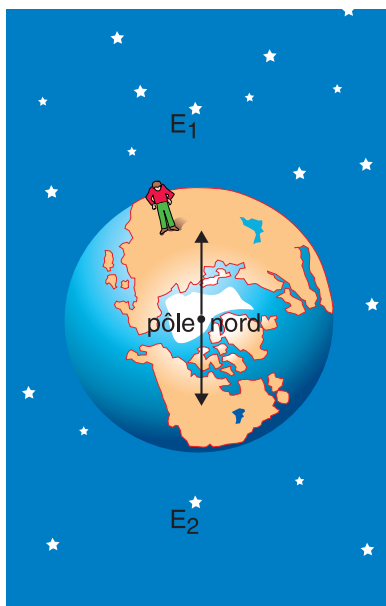
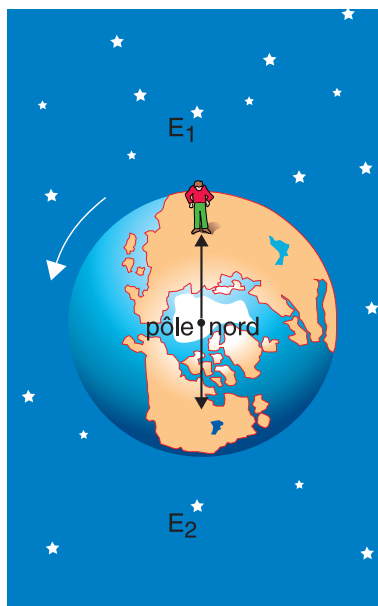
Commençons par la déviation de la chute libre des corps. Imaginons, ainsi que le fait Newton, une pierre qui tombe du haut d'une tour. La rotation de la Terre confère au sommet de la tour une vitesse plus grande qu'à son pied, puisque le sommet est plus éloigné du centre de la Terre (*cf.* la figure ci-dessous). La pierre va donc tomber un peu à l'est du pied de la tour. De combien sera la déviation ? Les calculs ne sont pas simples, et il faut tenir compte de la résistance de l'air, mais c'est très faible : de l'ordre de 4 millimètres pour 30 mètres de chute. L'expérience a été tentée de nombreuses



fois sans succès, pour finalement donner des résultats concluants en 1831 avec une hauteur de chute de 158 mètres dans un puits de mine.

Pas très spectaculaire, cet effet de la rotation de la Terre ? Avec le pendule de Foucault, c'est autre chose. Rappelons l'expérience. Sous la coupole du Panthéon à Paris, en 1851, une boule de 28 kilogrammes oscille, suspendue à un câble d'une longueur de 67 mètres. De majestueuses oscillations d'une amplitude de 6 mètres au total et d'une durée de seize secondes. Première oscillation, premier retour du pendule : bizarre, on voit la boule d'acier revenir à plusieurs millimètres à gauche de son point de départ. Deuxième aller et retour, nouveau décalage : à chaque oscillation, le pendule se décale et son plan d'oscillation tourne.

Pour expliquer ces fantaisies, il n'y a que deux possibilités : soit le pendule tourne, soit la Terre tourne. On ne voit pas bien pourquoi le pendule tournerait, et pourquoi ce serait toujours vers la gauche. Il faut donc conclure que c'est la Terre qui tourne et le plan d'oscillation du pendule qui reste fixe. Fixe par rapport à quoi ? À des étoiles lointaines, conclut Foucault. Comment comprendre ce phénomène ? Imaginons que nous suspendions le pendule au pôle Nord. Lançons-le de telle manière que son plan d'oscillation soit le plan qui contient le méridien de Paris. Au bout d'un aller et retour, vu d'une étoile lointaine, le pendule revient à son point de départ, mais la Terre a tourné dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Nous qui sommes sur la Terre voyons donc le pendule revenir à gauche de son point de départ. Imaginons pour les besoins de la démonstration qu'une oscillation dure six minutes, soit le dixième d'une heure : pendant ce temps-là, la Terre



Le pendule de Foucault au pôle Nord. Le pendule est suspendu au pôle Nord et oscille suivant le segment de droite enfermé entre deux flèches, pointant les étoiles E1 et E2. Au début de l'expérience, l'observateur, Mr X, voit le pendule arriver droit sur lui à la fin d'une oscillation. Une heure plus tard, la Terre a tourné par rapport aux étoiles dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, d'un angle de 15° ($1/24$ tour complet). Mais le pendule oscille toujours dans la direction des étoiles E1 et E2. Mr X a donc l'impression que le pendule s'est décalé vers sa gauche.

aura tourné du dixième de $1/24$ tour, soit $1,5^\circ$, et on verra donc le pendule se décaler d'autant (figure ci-dessus).

Ainsi, un physicien enfermé dans un train qui roule à vitesse constante tous rideaux tirés ne pourra inventer aucune expérience qui lui apprenne qu'il est en mouvement. Mais qu'il suspende une boule au bout d'un long fil, il pourra savoir que son train tourne, même si le mouvement est si lent que son corps ne le sent pas.

Force centrifuge et force de Coriolis

Allons un peu plus loin dans la description des conséquences observables du mouvement de la Terre. Un objet qui se déplace sur notre planète en rotation est soumis aux forces habituelles, pesanteur, frottements, etc., mais aussi à deux forces supplémentaires, la FORCE CENTRIFUGE et la FORCE DE CORIOLIS. La force centrifuge a laissé son empreinte dans la forme pas tout à fait sphérique de notre planète. Le rayon équatorial de la Terre est de 6 378 kilomètres, alors que le rayon polaire est de 6 357 kilomètres : cet aplatissement de la Terre aux pôles est un

effet de la force centrifuge. Il est beaucoup plus marqué pour les planètes géantes, qui sont gazeuses. Nous pourrions donc, rien qu'en contemplant une photo de la Terre vue de l'espace, nous écrier : « Et pourtant, elle tourne ! »

Autre effet de la force centrifuge : contrairement à ce qu'on croit, un fil à plomb n'indique pas exactement la direction du centre de la Terre. Le poids des corps est un mélange de l'effet de la gravité et de la force centrifuge. À l'équateur, la force centrifuge agit dans la direction opposée à la force de gravité, et les corps sont un tout petit peu plus légers qu'au pôle. Il faudrait que notre planète tourne dix-sept fois plus vite pour qu'à l'équateur les corps n'aient plus aucun poids apparent !

Et la force de Coriolis ? Nous en avons moins l'habitude. Pour en montrer les effets, réalisons une petite expérience avec un tour de potier pour enfants, un disque solidement fixé sur ce dernier et une bille en métal.

Un objet qui se déplace sur un support qui tourne nous semble donc dévier de la trajectoire en ligne directe, vers la droite



- Étape zéro : accordons-nous sur le vocabulaire. Comme les mathématiciens et les physiciens, nous dirons que quelque chose qui tourne dans le sens des aiguilles d'une montre tourne dans le sens rétrograde ; et dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, dans le sens direct.
- Étape un : entraînons-nous à lancer la bille d'un côté à l'autre du disque en passant par son centre.
- Étape deux : faisons tourner le disque, puis lançons la bille : au lieu d'aller « tout droit », elle se décale vers la droite (sa droite) si le plateau (vu du dessus) tourne dans le sens direct !
- Essayons de la lancer depuis l'autre côté du plateau : elle se décale toujours vers sa droite.
- Variante : il faut un tour de potier, un grand saladier qui ressemble le plus possible à une demi-sphère, une bille. Sur le saladier, on trace un demi-cercle qui le sépare en deux parties égales. Sans rotation, la bille lancée depuis le bord du saladier descend « tout droit », passe par le centre et remonte. Quand on fait tourner le tour, la bille nous semble dévier de cette trajectoire et partir vers la droite, si le tour tourne dans le sens direct. Précision : la droite est une notion relative, on le sait ! Ici, nous parlons de la droite pour un petit lutin qui serait perché sur la bille et regarderait vers l'avant, dans le sens du mouvement.
- Que se passe-t-il pour une rotation dans le sens rétrograde ? La bille semble alors se décaler vers la gauche. (Changer le sens de rotation du tour peut se révéler un peu délicat. On peut alors utiliser un tourne-disque : ceux-ci tournent dans le sens des aiguilles d'une montre.)

si la rotation se fait dans le sens direct, et vers la gauche si elle se fait dans le sens rétrograde. Sur le support Terre, il se passe la même chose. Dans l'hémisphère Nord, nous sommes dans le cas direct : si nous regardons la Terre d'au-dessus du pôle Nord, nous la voyons tourner dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Un boulet de canon semblera donc dévié vers la droite, qu'il ait été tiré du nord vers le sud ou l'inverse. L'effet est de quelques dizaines de mètres pour un tir sur 10 km. Pendant la bataille des îles Falkland (hémisphère Sud) durant la Première Guerre mondiale, les canons anglais, réglés pour corriger la force de Coriolis dans l'hémisphère Nord, ont tiré leurs obus une bonne centaine de mètres à gauche de leur cible !

Autre effet de la force de Coriolis : le sens d'enroulement des cyclones et des dépressions. Dans ces zones de basse pression, les masses d'air « coulent » tout en étant déviées vers leur droite. Imaginons une dépression dans l'hémisphère Nord. Les vents y arrivent par exemple du nord-ouest, mais comme ils sont systématiquement déviés vers la droite, ils s'enroulent autour de la dépression en forme de spirale, qui

tourne dans le sens direct – alors que, dans un anticyclone, les vents tournent dans le sens rétrograde. Tout cela s'inverse dans l'hémisphère Sud...

Et les lavabos, dans quel sens se vident-ils ? Grande question ! On lit parfois que dans l'hémisphère Nord, le petit tourbillon qui se forme quand on vide un lavabo tourne toujours comme une dépression, dans le sens direct, et qu'en Australie, les lavabos se vident dans l'autre sens. Faites donc l'essai (plusieurs essais) pour tester cette affirmation. En théorie, c'est vrai si le lavabo est très grand, mais les expériences très sérieuses qui ont été faites dans les années 1960 ont montré que le sens du tourbillon dépend essentiellement du reste du tourbillon qui s'est formé quand on a rempli le lavabo, et des petites irrégularités de la forme du récipient. Il faut attendre plusieurs heures pour que l'agitation disparaisse totalement et que le tourbillon tourbillonne dans le « bon » sens.

C'est la force de Coriolis qui est responsable de la déviation du pendule de Foucault. Cette affirmation va sembler bizarre au lecteur attentif, qui a remarqué que le pendule revient à gauche de sa

position initiale, alors que la force de Coriolis dévie les mouvements vers la droite. Rien de contradictoire à cela, cher lecteur : nous savons bien que la gauche et la droite, comme le mouvement, sont des notions relatives. Quand on le regarde de l'extérieur, le pendule se décale vers la gauche ; mais un lutin installé sur la boule du pendule le verra partir à droite, comme prévu.

Conclusion

La physique et l'astronomie nous donnent quelques raisons de penser que la Terre tourne bien sur elle-même par rapport aux étoiles, et pas le contraire (pas si « bien » que cela, mais elle tourne quand même). D'un autre côté, des observations astronomiques comme la PARALLAXE stellaire et l'ABERRATION des étoiles, observations qui datent du XIX^e siècle, montrent que la Terre est en

mouvement par rapport au Soleil. Tout est-il donc pour le mieux ? Pas tout à fait, car certains esprits forts doutent qu'on puisse en déduire que, dans *l'absolu* (un mot dont les physiciens se méfient beaucoup), la Terre est en mouvement. Faisons un petit effort d'imagination : si l'Univers tout entier avec ses dizaines de milliards de galaxies tournait autour de la Terre, pourrions-nous être absolument certains que les phénomènes que nous avons décrits plus haut n'existeraient pas ?

Laissons le mot final à Shakespeare, dans *Hamlet* (1600) :

Doubt thou the stars are fire ;

Doubt that the sun doth move

Doubt truth to be a liar.

(« Doute que les étoiles soient du feu/Doute que le Soleil se meuve/Doute que le vrai soit vrai. »)

Et pour aller plus loin, quelques questions d'enseignants

Pourquoi la Terre et tous les objets célestes tournent-ils ?

C'est vrai, la Terre tourne sur elle-même et autour du Soleil, le Soleil tourne sur lui-même et autour du centre de la galaxie, et la galaxie tourne sur elle-même... Cette rotation est due à la façon dont tous ces astres se sont formés. Le système solaire était au départ constitué d'un immense « nuage » de gaz et de poussières qui tournait très lentement sur lui-même. Quand ce nuage s'est effondré sous l'effet de son poids pour donner naissance au Soleil et aux planètes, il a beaucoup rétréci et la rotation s'est alors accélérée, de la même manière qu'un patineur tourne plus vite quand il replie les bras. Dans le système solaire, tout tourne donc dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (quand on regarde d'au-dessus du pôle Nord de la Terre) : les planètes autour du Soleil et les planètes sur elles-mêmes, sauf Vénus qui a reçu une grande claque lors d'une collision avec un astéroïde géant. Bien sûr, on peut aussi se demander pourquoi le nuage de gaz qui a donné naissance au système solaire tournait, même un petit peu. Il lui aurait été difficile de ne pas tourner du tout, car il était tirailé dans tous les sens par les forces de gravité des étoiles environnantes et d'autres nuages de gaz ; ces forces n'avaient aucune raison de s'annuler parfaitement. En fait, pour autant qu'on le sache, il n'y a qu'une chose qui ne tourne pas : c'est sans doute l'Univers lui-même !

Quels sont les éléments qui peuvent contredire le système géocentrique ?

Les mouvements du Soleil et des planètes dans le ciel peuvent parfaitement *se décrire* dans un système géocentrique, même si cela n'est pas très simple. Mais pas question d'*expliquer* et *prédire*

le mouvement des planètes sous l'effet de la force de gravité avec la théorie de Newton si on met la Terre au centre du système solaire ! La force du système héliocentrique est de donner une explication unique à des phénomènes aussi divers que la forme un peu aplatie du globe terrestre, le sens d'enroulement des cyclones et des dépressions, l'expérience du pendule de Foucault, les effets de parallaxe des étoiles et d'aberration de la lumière : le mouvement de la Terre, sur elle-même et autour du Soleil. Si on adopte le point de vue géocentrique, on peut sans doute fournir une explication à chacun de ces phénomènes, mais pas trouver le lien qui les relie entre eux... Pour la physique, le point de vue héliocentrique est donc non seulement plus simple, mais aussi beaucoup plus riche et fécond que le point de vue géocentrique.

Comment expliquer le phénomène des marées ?

La Lune exerce sur les océans terrestres une force de gravité qui est plus importante du côté de la Terre proche de notre satellite qu'au centre de la Terre, et plus faible du côté éloigné. Le côté proche est donc « plus » attiré par la Lune que le centre de notre planète : les océans se soulèvent et c'est marée haute. Mais du côté opposé de la Terre, la force de gravité est plus faible qu'au centre du globe, et les océans semblent attirés... dans la direction opposée à la Lune. Il y a, en définitive, deux « bourrelets » de marée dans les océans, l'un se trouve à peu près dans la région du globe située sous la Lune, l'autre dans la région opposée. Comme la Terre tourne, cela veut dire qu'il y a, en général, deux marées hautes par jour. En réalité, le phénomène est bien plus complexe : pour déterminer le nombre de marées, leur amplitude, et leurs variations au cours de l'année, il faut tenir compte de l'influence du Soleil et de la forme des côtes.

Bibliographie

Top chrono, Franklyn-M. BRANLEY, « Castor Doc », Flammarion, 1998.

Voyage dans la Lune : l'autre monde ou les états et empires de la Lune, Cyrano DE BERGERAC, 1657, « GF », Flammarion, 1970.

Les Découvreurs, Daniel BOORSTIN, « Bouquins », Robert Laffont, 1986.

Le Pendule de Foucault, Umberto ECO, Grasset, 1990.

Astronomie populaire (notamment le chapitre VI : Démonstration théorique et pratique des mouvements de notre globe), Camille FLAMMARION, 1880.

Entretiens sur la pluralité des mondes, Bernard LE BOVIER DE FONTENELLE, 1686, éditions de l'Aube, 1994.

Et pourtant elle tourne, Jacques GAPAILLARD, « Science ouverte », éditions du Seuil, 1993 (voir notamment le chapitre 13 pour des

explications sur l'aberration et la parallaxe des étoiles qui n'ont pu être développées ici).

Dialogue sur les deux grands systèmes du monde, GALILÉE, 1632, « Points-Seuil », 2000.

Les cadrans solaires, Denis SAVOIE, Pour la Science, 2003.

Histoire de l'astronomie, Jean-Pierre VERDET, « Points Sciences », éditions. du Seuil, 1990.

Sur la Toile

Sur le pendule de Foucault :

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/RefTerre/Foucault0.html>

Lavabos et force de Coriolis :

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-modelisation-coriolis.xml>

Cette ressource est issue de l'ouvrage *29 notions clés pour savourer et faire savourer la science*, paru aux Éditions Le Pommier.



Le meilleur des Graines de sciences

Vous êtes enseignant, parent, éducateur... et vous manquez parfois de « munitions » pour répondre aux questions des enfants...

Or, en classe, à la maison, au centre de loisirs, celles-ci fusent : « Le Soleil va-t-il s'éteindre ? » « Est-ce qu'il y a des tremblements de terre sous la mer ? » « Où va l'eau qui tombe du ciel ? » « Pourquoi le ciel est-il bleu le jour ? » « Qu'est-ce que l'effet de serre ? » « Pourquoi les animaux migrent-ils ? » « C'est quoi le clonage ? »

Cet ouvrage de référence va vous aider à répondre à ce bombardement de curiosité... en toute connaissance de cause !

Fruit d'une rencontre entre des scientifiques et des enseignants, désireux de partager savoir et expérience, il est précisément conçu pour vous permettre d'acquérir ou d'approfondir une culture scientifique, si précieuse pour appréhender le monde qui nous entoure... et pour l'expliquer !

Du Soleil à la cellule, du cycle de l'eau aux énergies renouvelables, de l'origine de l'homme au nanomonde, les 29 notions réunies dans ce volume constituent le bagage indispensable pour pérégriner, avec les enfants, en sciences, et ce, de la maternelle au collège. On les retrouve d'ailleurs dans le Socle commun de connaissances et de compétences, qui définit ce que l'école puis le collège doivent, en France, s'imposer de transmettre à tous les enfants.



Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes

75006 Paris

01 85 08 71 79

contact@fondation-lamap.org

Site : www.fondation-lamap.org

 FONDATION
La main à la pâte
POUR L'ÉDUCATION À LA SCIENCE