

Auteurs : Fabienne Casoli(plus d'infos)

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. Chapitre issu de l'ouvrage "29 notions clés pour savourer et faire savourer la science - primaire et collège", paru aux éditions Le Pommier en août 2009.

Copyright : Creative Commons France. Certains droits réservés.



Les mouvements de la Terre

«*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

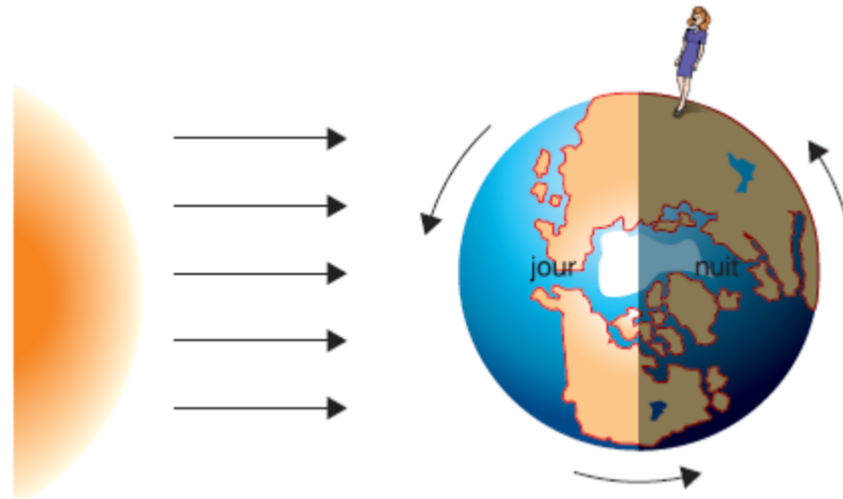
Le jour et la nuit. Depuis Galilée, et Copernic avant lui, premier astronome moderne à avoir défendu cette idée, tout le monde est d'accord : la Terre tourne sur elle-même par rapport au Soleil et aux étoiles. Ce mouvement produit l'alternance des jours et des nuits. Une moitié de la Terre est éclairée 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 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.



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.

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 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

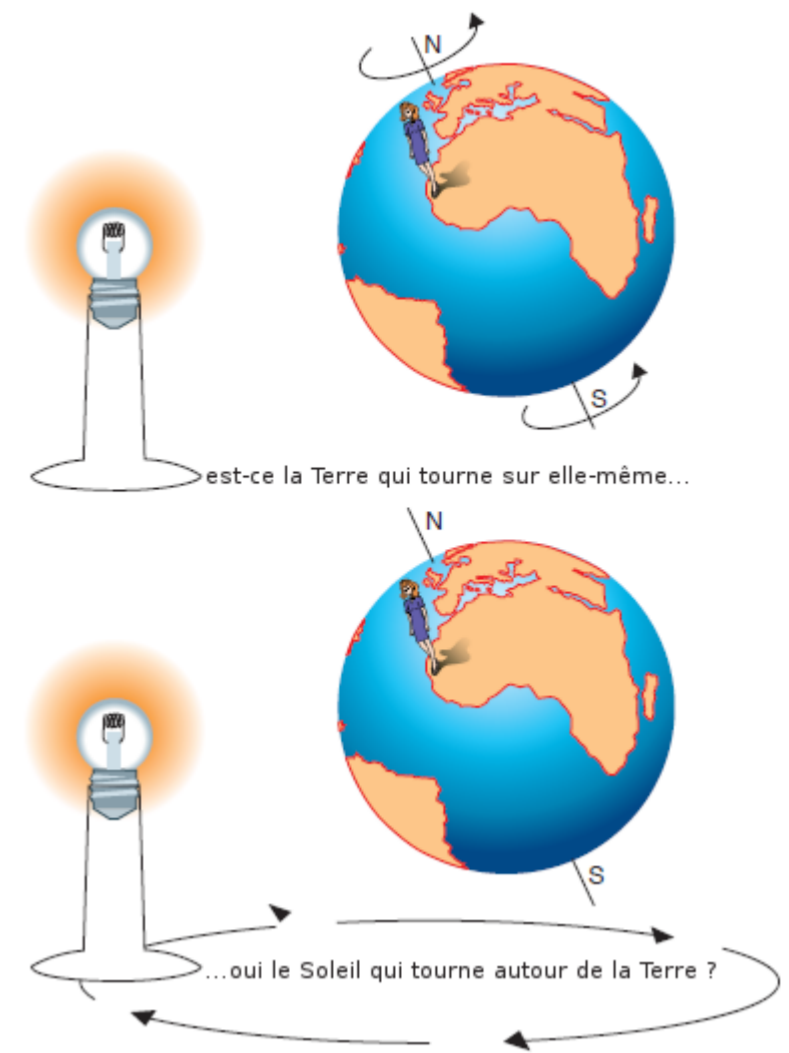
Choisissons donc le point de vue selon lequel la Terre tourne sur elle-même. Tourne par rapport à quoi ? Au Soleil, certes. Aux étoiles, d'accord. Mais ce n'est pas tout à fait la même chose...

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'oeil 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 l'expérience précédente : 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 heures $\times (365,15/366,15) = 23$ heures, 56 minutes et 4 secondes !

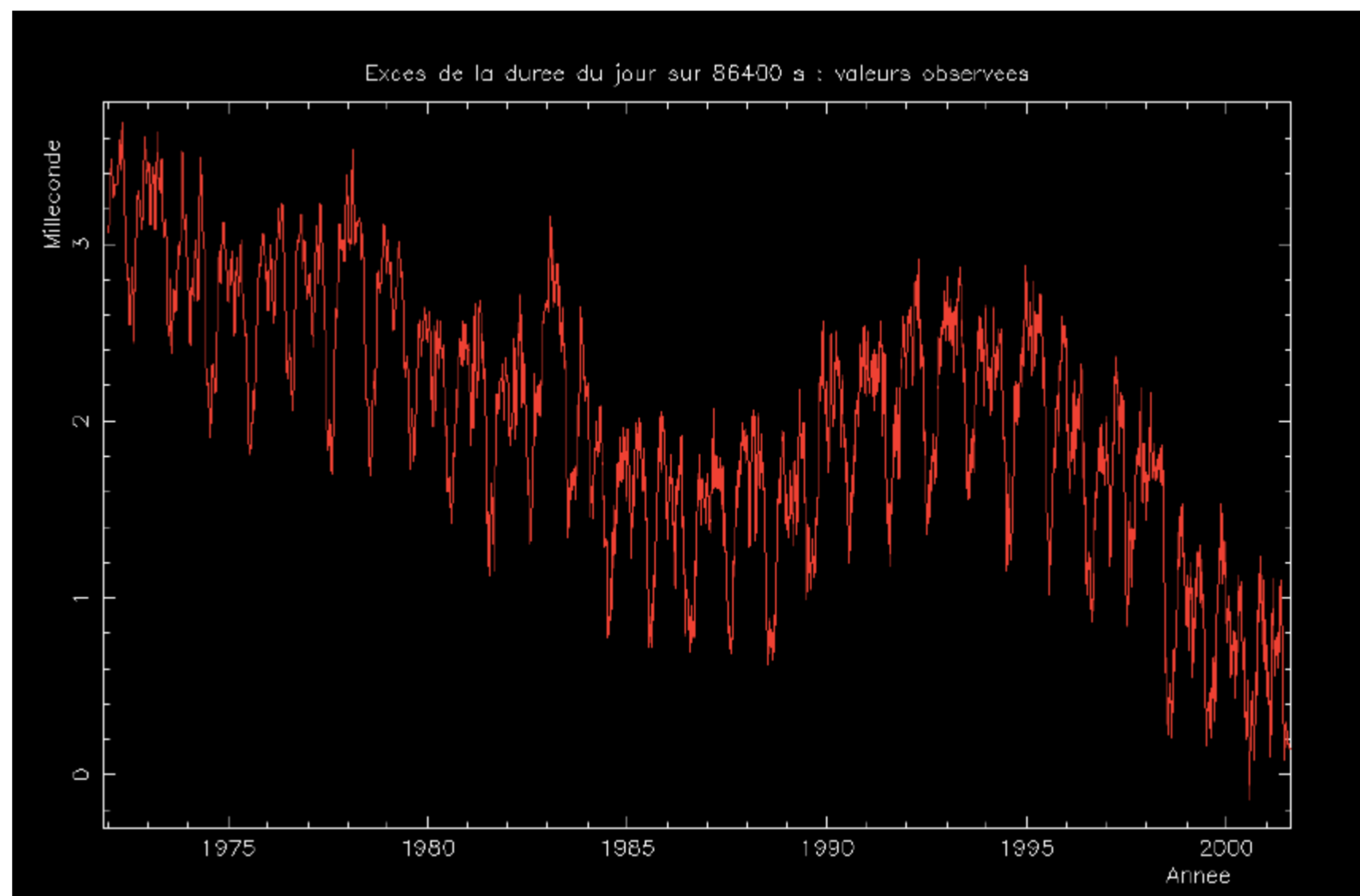
Si le père de Stella, qui est resté sur Terre, voulait saluer sa fille chaque fois qu'il la voyait passer dans le ciel, il devrait aussi le faire toutes les 23 heures, 56 minutes et 4 secondes. Cet intervalle est effectivement celui qui sépare deux passages d'une étoile au méridien (c'est-à-dire, comme 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.



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.

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, 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 jours \times 2 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.

