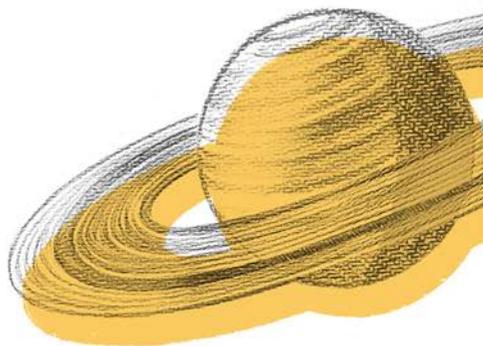




EXPÉRIMENTER L'ESPACE

← DANIEL ROUAN →



*Ce livre est dédié à
Lilah, Maïary et Noah
mes petits-enfants
pleins de vie, de joie, de curiosité
et pourvoyeurs de belles
tranches de bonheur.*

Daniel Rouan

Directeur de recherche CNRS émérite au LESIA
Membre de l'Académie des sciences
Président de la Fondation *La main à la pâte*

**Cet ouvrage a été réalisé dans le cadre du partenariat
ESERO France entre le CNES et la Fondation *La main à la pâte*.
ESERO (European Space Education Resource Office)
est un programme éducatif de l'ESA coordonné en France par le CNES.**

© European Space Agency – Centre National d'Etudes Spatiales – Fondation La main à la pâte - 2022

Remerciements : Eve Montier-Sorkin

Illustrations : Studio Ogham - Jean-Michel Jumeau

Montage : StudioGrafic CNES

Imprimé en France par Imprimerie Messages (Toulouse)



Crédits photos :

© Guillaume Soto Léna
pour Fondation *La main
à la pâte*

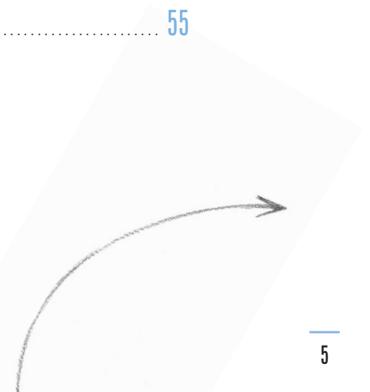
© Page 7 Adobe Stock

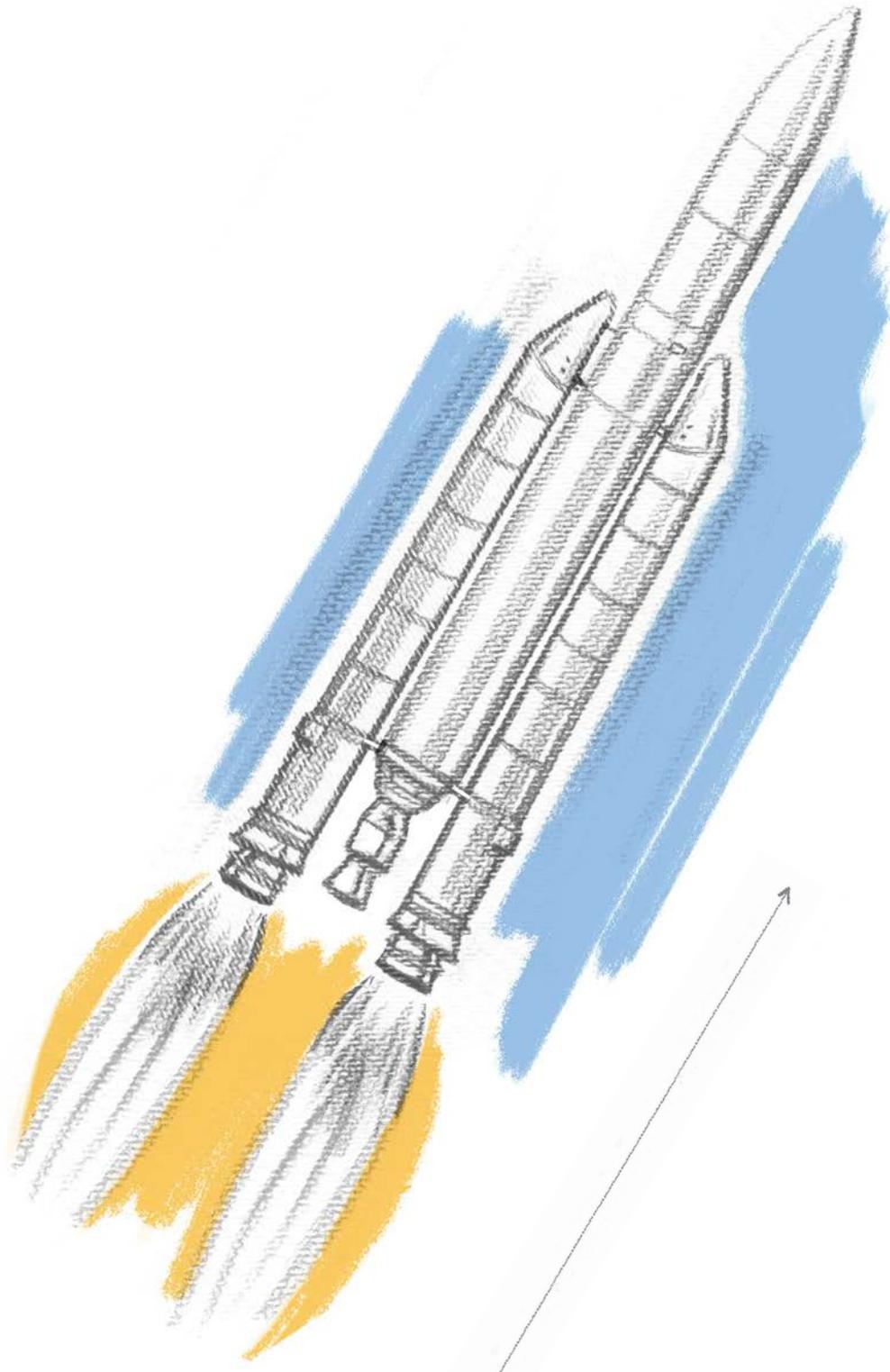
© Page 25 ESA/NASA/, 2021

TABLE DES MATIÈRES



	PRÉFACE	1
I	L'ESPACE ?	5
II	OÙ COMMENCE L'ESPACE ?	9
III	POURQUOI UNE FUSÉE DÉCOLLE-T-ELLE ?	13
IV	POURQUOI UN SATELLITE NE RETOMBE-T-IL PAS ?	19
V	L'APESANTEUR	25
VI	DIMENSION DE LA TERRE	29
VII	DISTANCE TERRE-LUNE	33
VIII	LE TEMPS	39
IX	DURÉE DU JOUR : 24 HEURES ?	43
X	DURÉE DE L'ANNÉE	49
XI	LES « ANNÉES » DES PLANÈTES	51
XII	POSITION DES PLANÈTES DU SYSTÈME SOLAIRE	55





I

L'ESPACE ?

L'espace est un mot qui évoque deux idées différentes :

La première, c'est celle de la place disponible :
« il y a beaucoup d'espace entre les arbres dans ce jardin ».

La seconde, c'est celle, plus mystérieuse, de ce qui peut se trouver au delà de l'atmosphère de la Terre, le domaine des satellites, mais aussi des planètes, des étoiles, et d'objets encore plus lointains et étranges, les galaxies.

C'est cet espace là dont je vais te parler.

Tu as déjà dû entendre parler de satellite, de fusée, de lanceur, d'engin spatial, de sonde spatiale.

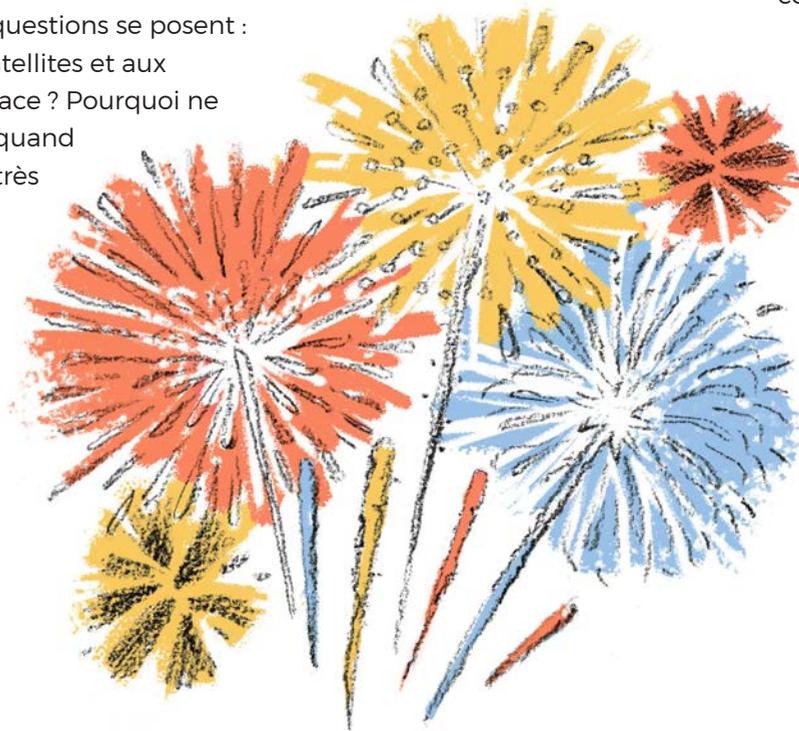
Tu as sûrement vu à la télévision ou dans des films le lancement d'une fusée qui produit **une énorme flamme** à sa base et s'élève tout droit en accélérant de plus en plus pour disparaître de la vue en quelques minutes.

OÙ COMMENCE
L'ESPACE ?

On dit qu'elle part dans l'espace, mais c'est quoi exactement l'espace ? Où commence-t-il ? Qu'est-ce qui le rend différent de l'atmosphère où évoluent les avions ? Pour les avions qui peuvent voler si haut qu'on ne les voit plus, on ne dit pourtant pas qu'ils sont dans l'espace.

Et puis beaucoup d'autres questions se posent : qu'est-ce qui permet aux satellites et aux fusées de **«voler»** dans l'espace ? Pourquoi ne retombent-ils pas, comme quand on lance une pierre en l'air très haut ou même une fusée de feu d'artifice ? C'est quoi l'apesanteur ?

C'EST QUOI
L'APESANTEUR ?



On va essayer d'examiner toutes ces questions et aussi de mieux comprendre ce qu'est le temps, comment on le mesure.

La science qui s'intéresse à tout ce qui concerne l'espace et les astres, s'appelle l'astronomie, mais parfois on parle aussi d'astrophysique. On appelle plus particulièrement **astronautique** la science du lancement des fusées et du contrôle des satellites et des sondes spatiales.



Dans ce livre, je vais te proposer de faire des expériences qui permettront de mieux comprendre les explications scientifiques. Elles sont assez faciles à réaliser et ne demandent pas de matériel spécial, mais plutôt des objets de la vie de tous les jours.

Parfois tu auras peut être **besoin d'un peu d'aide** d'un adulte ou d'une grande sœur ou d'un grand frère.

FAIRE DES
EXPÉRIENCES POUR
MIEUX COMPRENDRE
LA SCIENCE.



Essaie vraiment de les réaliser, tu verras que c'est une très grande satisfaction de construire une expérience, de la régler, de modifier certains de ses éléments, car cela fonctionne rarement du premier coup et enfin de réussir mais aussi de comprendre pourquoi elle fonctionne.

En réalisant ces expériences, tu seras un moment dans la peau d'un scientifique.

Note bien que quand il a réussi une expérience, le scientifique doit absolument expliquer en détail comment il a fait, afin que les autres chercheurs puissent refaire l'expérience et vérifier ses résultats.

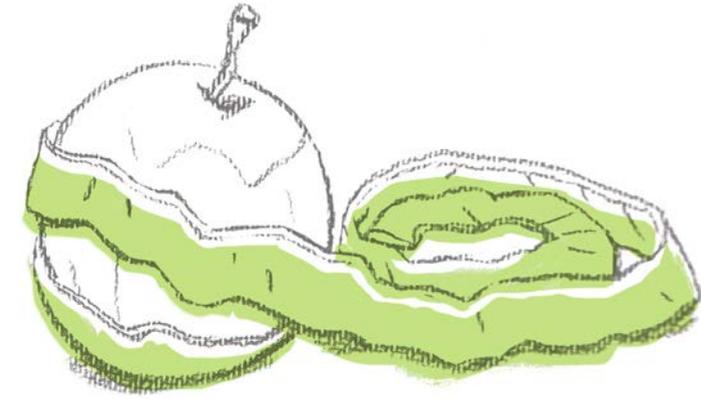
En science, on ne donne jamais une information ou un résultat sans expliquer comment on y est arrivé.

Ce n'est pas ce qu'il se passe pour beaucoup d'informations que l'on trouve sur internet où certaines personnes affirment des choses, mais sans dire d'où cela vient, comment ils ont obtenu le résultat : personne ne peut alors vérifier si c'est exact ou non.

CONSTRUIS UNE
EXPÉRIENCE

Très souvent en creusant un peu, on se rend compte que c'est faux et basé sur des croyances ou des opinions et non sur des expériences.

METS TOI DANS
LA PEAU D'UN
SCIENTIFIQUE



//

OÙ COMMENCE L'ESPACE ?

Une première question est donc où commence l'espace ?

A ton avis ? Est-ce que c'est à partir du sommet des plus hautes montagnes ? Est-ce que c'est quand on se trouve au delà de la Lune ?

Tu sais que la planète Terre est entourée d'une couche d'air que l'on appelle l'atmosphère.

Mais quelle est l'épaisseur de cette couche ?

En fait elle n'est pas très grande et comparée au rayon de la Terre, elle est même très petite : à peu près mille fois plus petite.

Un peu comme la couche de vernis à la surface d'une bille, ou la peau d'une pomme.

On peut s'en rendre compte, en grimpant en haut des montagnes : il devient un peu plus difficile de respirer quand on fait des efforts, car il y a moins d'air.

Or l'altitude d'une montagne est petite par rapport au rayon de la Terre : la plus haute montagne au monde, **le mont Everest au Népal**, un pays d'Asie, atteint 8,2 kilomètres, ce qui est petit devant les 6 400 km du rayon de la Terre.

On observe une diminution progressive de la quantité d'air quand on s'élève dans l'atmosphère. Par exemple, si l'on monte en haut d'une montagne de 5000 mètres, **il y a deux fois moins d'air disponible**. C'est la raison pour laquelle les avions ont un système qu'on appelle *pressurisation* qui maintient dans la cabine une quantité d'air suffisante, comme si on était à peu près à 1500 mètres d'altitude.

Expérience :

Je te propose une expérience qui permet de voir cet effet de la diminution de la quantité d'air disponible quand on s'élève en altitude.

Il faut d'abord trouver une petite bouteille en verre (pas en plastique, elle serait trop molle pour notre expérience). Ensuite, avec l'aide d'un adulte, il faut tailler un bouchon en liège pour qu'il puisse s'adapter sur le goulot et fermer la bouteille de façon étanche.



Il faut alors percer le bouchon pour pouvoir y introduire un tube fin transparent : ce peut être une paille en plastique ou un bout de tube de stylo bille presque vide. Le tube doit être bien ajusté dans le trou : si l'on souffle dans le tube, l'air ne doit pas s'échapper. Le tuyau doit arriver au fond de la bouteille et dépasser un peu du bouchon. Tu introduis de l'eau (1/4 de la bouteille), si possible avec du colorant comme quelques gouttes d'encre. Tu fermes bien en enfonçant le bouchon : de l'eau doit monter un peu dans le tuyau au moment où tu appuies bien sur le bouchon.

Il ne reste plus qu'à prendre un ascenseur qui monte au moins au dixième étage d'un grand immeuble (peut-être le tien ?).

On peut aussi prendre un chemin qui monte en haut d'une colline ou grimper un long escalier d'au moins 150 marches, mais c'est plus long et plus difficile. Tu verras, arrivé au dernier étage, que l'eau sera montée de 2 ou 3 cm dans le tube. C'est normal : il y a un peu moins d'air disponible à l'extérieur de la bouteille et donc celui qui est dans la bouteille pousse pour essayer de compenser ce manque et fait monter de l'eau dans le tube. Si tu redescends au rez-de-chaussée, tu verras que le niveau redescend dans le tube. Ce coup-ci, c'est l'air autour de la bouteille qui pousse sur l'eau par le haut du tube et la fait redescendre. On dit que la pression de l'air extérieur est plus grande que dans la bouteille.

Attention, pour bien réussir cette expérience il faut éviter que la température de la bouteille change durant l'expérience, sinon le niveau de l'eau varierait dans le tube : attendre quelques minutes avant de rentrer dans la cabine de l'ascenseur puis déboucher et reboucher pour que le niveau dans le tube soit un peu au-dessus de la surface de l'eau. Tenir la bouteille par le col pour éviter de chauffer la bouteille avec la chaleur de la main.

L'ESPACE
COMMENCE
QUAND ON
EST SORTI DE
L'ATMOSPHÈRE
DE LA TERRE

Si l'on allait à 20 kilomètres d'altitude, alors on ne serait toujours pas complètement sorti de l'atmosphère, mais il n'y aurait plus qu'un petit peu d'air disponible et **on ne pourrait plus respirer du tout**. On pourrait alors considérer que presque toute l'atmosphère (en réalité 88%) est au-dessous de nous et que l'on a presque atteint la limite de l'atmosphère. En fait, c'est quand **une fusée dépasse environ 100 km d'altitude**, qu'alors on pourra dire qu'elle est déjà dans l'espace. Ainsi les satellites les plus bas tournent autour de la Terre à environ 300 km d'altitude où il n'y a pratiquement plus d'atmosphère du tout.

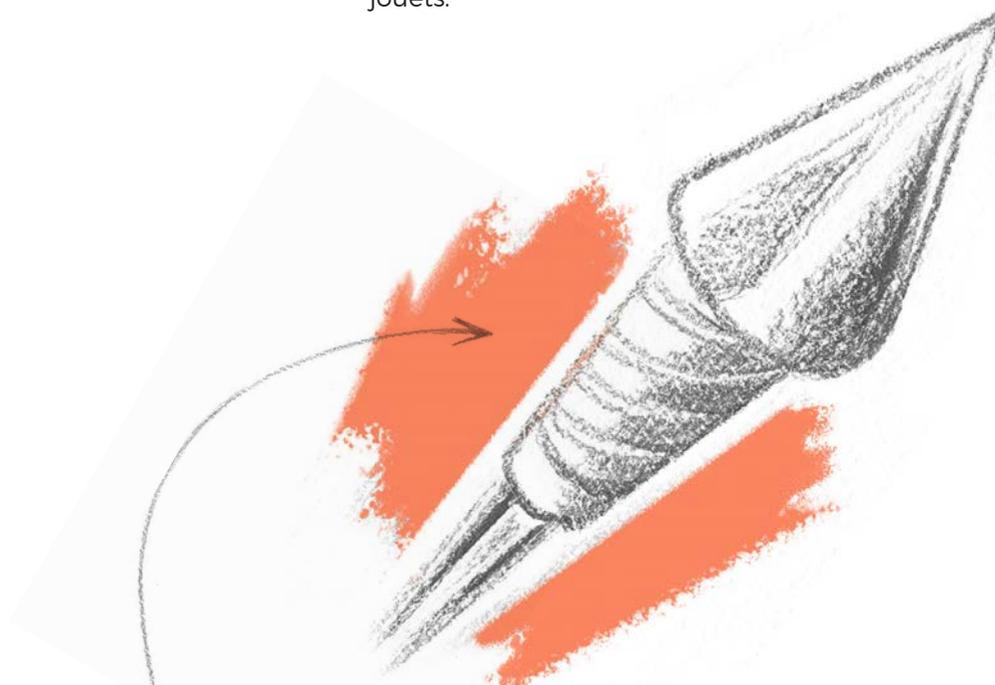
En résumé, on peut dire que l'espace commence quand on est sorti de l'atmosphère de la Terre, c'est-à-dire quand on a atteint une altitude plus grande que 100 km. Cela paraît beaucoup, mais comparé au rayon de la Terre, c'est petit : c'est un peu comme si les habitants d'une pomme se rendaient sur l'extérieur de la peau de la pomme.



POURQUOI UNE FUSÉE DÉCOLLE-T-ELLE ?

Tu as déjà bien sûr vu des feux d'artifices, avec des fusées qui montent très haut dans le ciel en faisant une petite flamme derrière elles.

Peut-être même as-tu déjà toi-même avec l'aide d'adultes, tiré un feu d'artifice comme ceux qu'on peut trouver dans les magasins de jouets.



Les fusées sont mises en mouvement (on dit propulsées) en éjectant à une extrémité du gaz très chaud qui provient d'une matière qui brûle très rapidement dans le tube de la fusée. Le gaz produit ne peut s'échapper que par le bas du tube, l'autre extrémité étant bouchée. C'est le même principe que les réacteurs des avions.

Dans ceux-ci, on enflamme de l'essence pour avion (qu'on appelle du kérosène) qui chauffe l'air qui est avalé à l'avant du réacteur puis est comprimé par une grosse hélice avec plein de pales. Tu as sûrement remarqué ces hélices à l'entrée des réacteurs d'avion. Cela produit une éjection très importante de gaz chaud vers l'arrière.

Dans les deux cas, avion ou fusée, c'est l'effet de l'action et de la réaction qui les fait avancer.

Tu as sûrement déjà vu cet effet qui fait que lorsque l'on lâche un ballon d'anniversaire bien gonflé, il se met à partir à toute vitesse dans la direction opposée à l'orifice du ballon (là où l'on a soufflé pour le gonfler) et à tourner dans la pièce comme un fou. C'est l'air qui sort du ballon très vite qui fait que le ballon part dans l'autre direction.

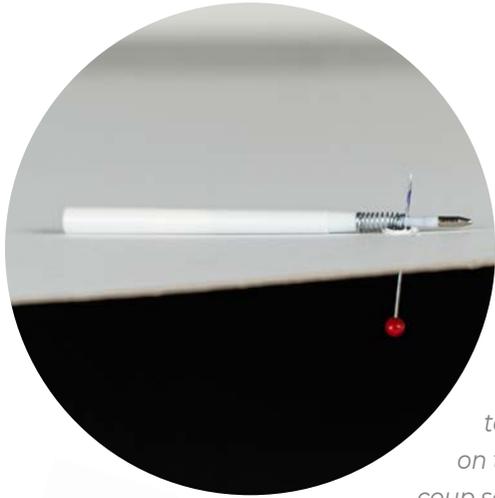
LE BALLON SE MET
À PARTIR À TOUTE
VITESSE DANS
LA DIRECTION
OPPOSÉE



Cet effet d'action / réaction se produit quand deux objets se séparent brusquement à cause d'un ressort comprimé entre les deux et qui se détend ou bien d'une explosion entre les deux, ils partent toujours dans deux directions opposées, celui qui est le plus léger prenant la vitesse la plus grande.

Expérience :

1 - Fusée à ressort : on peut fabriquer facilement une fusée à ressort en démontant un stylo à bille à pointe rétractable. Il y en a qui ne sont vraiment pas cher mais le mieux est d'en trouver un qui ne fonctionne plus car il n'a plus d'encre. On récupère le tube fin avec la pointe bille qui contient l'encre, ainsi que le ressort. Pour la suite fais-toi aider et mets des gants jetables et travaille sur une table protégée par un vieux journal ou du papier essuie-tout, car de l'encre risque de sortir du tube. On met le ressort à sa place normale sur le tube, on le comprime au maximum avec la main et on fait une petite marque au feutre sur le tube, juste au-dessus du ressort. Il faut alors percer le tube sur la marque, en travers, avec une épingle. C'est la phase la plus délicate : on peut tenir avec une paire de pince une épingle que l'on chauffe d'abord sur une bougie puis qu'on enfonce doucement pour traverser le tube. On enlève l'épingle, on enfile le ressort que l'on comprime et on remet l'épingle de façon à ce qu'elle ressorte suffisamment pour maintenir le ressort comprimé, comme sur la photo.



On pose alors le tout sur un carton dans lequel on a fait un petit trou pour y passer la tête de l'épingle. On fait s'éloigner les personnes présentes des deux côtés de l'axe du tube. En tenant le carton horizontalement, on tire sur l'épingle vers le bas d'un coup sec, et on regarde ce qu'il se passe.

Où vont le ressort et le tube ?

Pour faire partir encore plus loin le tube qui représente notre fusée, on peut enfiler devant le ressort, contre l'épingle, quelques petits écrous, qui partiront avec le ressort.

Pourquoi la fusée va-t-elle alors plus loin ?

Si tu as bien lu ce qui précède, tu dois pouvoir répondre.

2 - Fusée à eau : cette fois, la fusée s'approchera un peu plus d'une vraie fusée car, bien entendu, des fusées qui seraient lancées dans l'espace par des ressorts, cela n'existe pas : il faudrait des ressorts tellement géants qu'on ne saurait pas les fabriquer. Ici, ce ne sera cependant pas du gaz très chaud qui sortira du bas de la fusée (on dit de la tuyère), mais de l'eau et de l'air. Il faut deux bouteilles en plastique d'eau gazeuse : elles sont en effet plus rigides. La première sera le corps principal de la fusée. Avec l'aide d'un adulte, tu coupes juste le haut et le bas d'une autre bouteille pour obtenir un cylindre de 20 cm environ que tu enfiles sur la bouteille-fusée de façon à ce qu'il dépasse du goulot de 2 cm environ. Si l'on a de la chance, le cylindre est bien ajusté sur la bouteille et tient bien, sinon, qu'il soit trop large ou trop petit, il suffit de le fendre sur sa longueur pour qu'il s'enfile sur la bouteille-

fusée et de le ceinturer avec du ruban adhésif pour le fixer sur cette dernière et fermer la fente. C'est sur ce cylindre que la fusée va se tenir droite avant le départ. On peut fabriquer quatre petites ailettes sur le bas du cylindre en découpant des petits rectangles et en pliant le plastique comme sur la photo. La fusée ira ainsi plus droit.

On y est presque : il ne reste plus qu'à tailler un bouchon de liège en lui donnant une forme un peu conique pour qu'il s'ajuste sur le goulot en forçant un peu. On pique ensuite au travers du bouchon une aiguille creuse qui sert à gonfler les ballons de sport et qui s'adapte sur une pompe à vélo. La fusée est terminée. Elle doit ressembler à la figure ci-dessous.

On commence par la remplir au 1/4 d'eau en mettant bien sûr le goulot vers le haut, on ajuste ensuite bien fermement le bouchon muni de l'aiguille : plus il sera coincé et plus haut la fusée partira. Sur une planche, ou un carton solide percé d'un trou assez gros pour pouvoir passer le tuyau d'une pompe à vélo, on pose la fusée droite, goulot en bas, en appuyant sur le cylindre. Une moitié de la planche peut être posée sur une table, à l'extérieur bien sûr, et maintenue par un gros poids (une bouteille pleine d'eau par exemple). On visse le tuyau de la pompe sur l'embout de l'aiguille de gonflage.



Le compte à rebours peut commencer : on fait fonctionner la pompe à vélo jusqu'à ce que d'un seul coup la fusée décolle et monte à au moins une dizaine de mètres de hauteur, parfois en arrosant le pompeur !

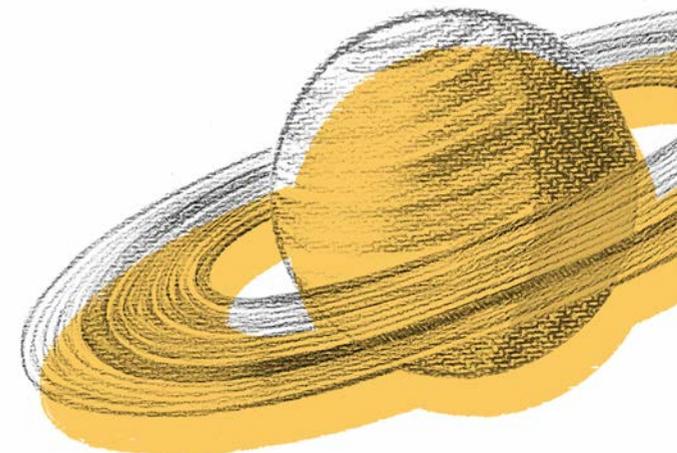
Il faut que les spectateurs s'éloignent un peu et que la fusée parte bien verticalement pour éviter que quelqu'un la reçoive au décollage.

La fusée est propulsée par l'eau qui sort brutalement par le goulot et qui est poussée par l'air qui a été comprimé dans la bouteille. Comme on l'a vu plus haut, si de l'eau est éjectée dans une direction alors la bouteille partira dans la direction opposée.

Pour que la fusée aille le plus haut, il ne faut pas la remplir complètement d'eau, sinon il n'y aurait pas assez d'air comprimé pour pousser l'eau et si l'on met trop peu d'eau, alors on n'en fera pas partir suffisamment pour que la fusée s'élève assez haut. Il faut faire des essais successifs pour trouver la bonne quantité d'eau.

En résumé, une fusée s'élève parce qu'elle éjecte par le bas du gaz très chaud produit en brûlant un liquide à l'intérieur. L'effet physique qu'on appelle *action/réaction* fait qu'elle part dans la direction opposée à celle du gaz éjecté, comme un ballon d'anniversaire que l'on lâche après l'avoir gonflé.

TRUVE
LA BONNE
QUANTITÉ
D'EAU



IV

POURQUOI UN SATELLITE NE RETOMBE-T-IL PAS ?

On a vu comment aller dans l'espace, mais on peut se poser la question : pourquoi la fusée ne retombe-t-elle pas sur Terre ? Quelle différence avec une fusée de feu d'artifice qui, elle, retombe ?

En fait, ce n'est pas un problème dont la solution est intuitive et il a fallu attendre le 17^e siècle pour bien tout comprendre. C'est le grand savant Isaac Newton qui a donné l'explication.

Au fait pourquoi les objets qu'on lance en l'air ou bien qu'on lâche retombent-ils par terre ? Et nous-même, pourquoi si l'on saute en l'air on retombe tout de suite ?

La réponse est que la Terre qui a une masse gigantesque attire vers son centre tout ce qui s'y trouve, objets comme êtres vivants. **C'est un peu comme si un ressort invisible nous tirait vers le sol.** Même l'air que nous respirons est attiré : c'est ce qui explique que l'atmosphère reste « accrochée » à la planète et ne se sauve pas dans l'espace, heureusement pour nous !

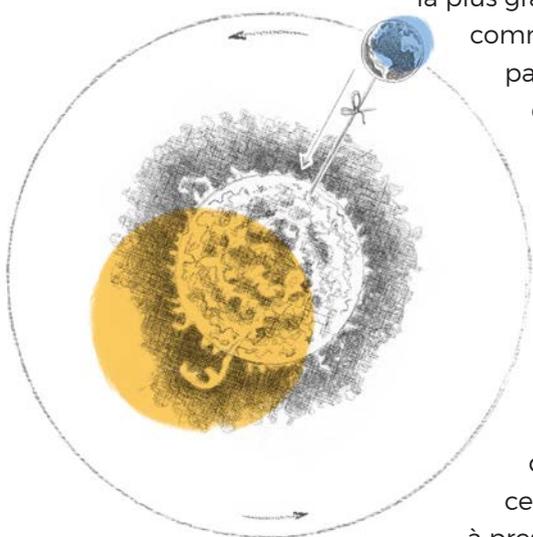
Cette force qu'exerce la Terre, on l'appelle force de gravitation. Toutes les autres planètes ainsi que les étoiles produisent une telle force autour d'elles. **C'est à cause de cette force que les planètes restent autour du Soleil :** celui-ci, ayant

la plus grande masse, les retient, un peu comme si elles étaient attachées par une ficelle invisible qui les empêche de s'éloigner et ne leur permet que de tourner autour de lui.

Cette force diminue quand on s'éloigne de la Terre, mais qu'assez doucement et, par exemple, elle est encore assez importante pour retenir la Lune autour

d'elle alors que celle-ci est pourtant à presque 400 000 km de distance.

Une fusée qu'on lance dans l'espace reste très près de la Terre, et donc est soumise à cette force de gravitation, pratiquement autant que nous, restés sur le sol.

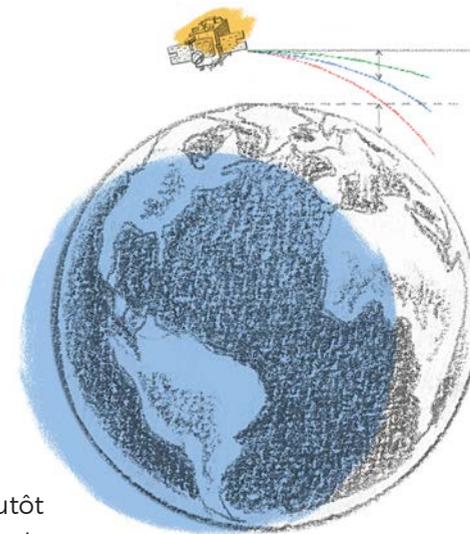


PRESQUE
400 000 KM
ENTRE LA TERRE
ET LA LUNE

On revient donc à la question : pourquoi une fusée ne retombe-t-elle pas sur Terre ?

Soyons d'abord plus précis : quand une fusée lance un satellite, en fait une grosse partie de la fusée retombe bien sur le sol ou plutôt en mer où il y a beaucoup de place et où l'on ne risque pas de blesser des gens. Tu as sans doute entendu parler des étages d'une fusée : ce sont les différents tronçons qui ont chacun un moteur-fusée : ils s'allument l'un après l'autre en commençant bien sûr par celui qui est le plus bas, **chaque tronçon se détachant quand il n'a plus de carburant.** C'est le dernier tronçon qui va mettre le satellite en place sur son trajet, on dit sur son orbite, autour de la Terre.

Regardons maintenant de plus près comment le satellite avance sur cette orbite. Si le dernier étage de la fusée a poussé le satellite à grande vitesse parallèlement au sol, alors plusieurs cas peuvent se produire. **Dans le premier, la vitesse n'est pas assez grande et le satellite va effectivement retomber sur Terre,** comme le ferait par exemple une balle lancée horizontalement, même avec une grande force. Sur la figure cela correspond à la trajectoire en rouge. Dans un deuxième cas, la vitesse est tellement grande que le satellite tombe toujours mais il s'éloigne de la surface de la Terre : c'est la trajectoire en vert sur la figure. Dans le troisième cas (trajectoire en bleu), la vitesse est telle que le satellite tombe



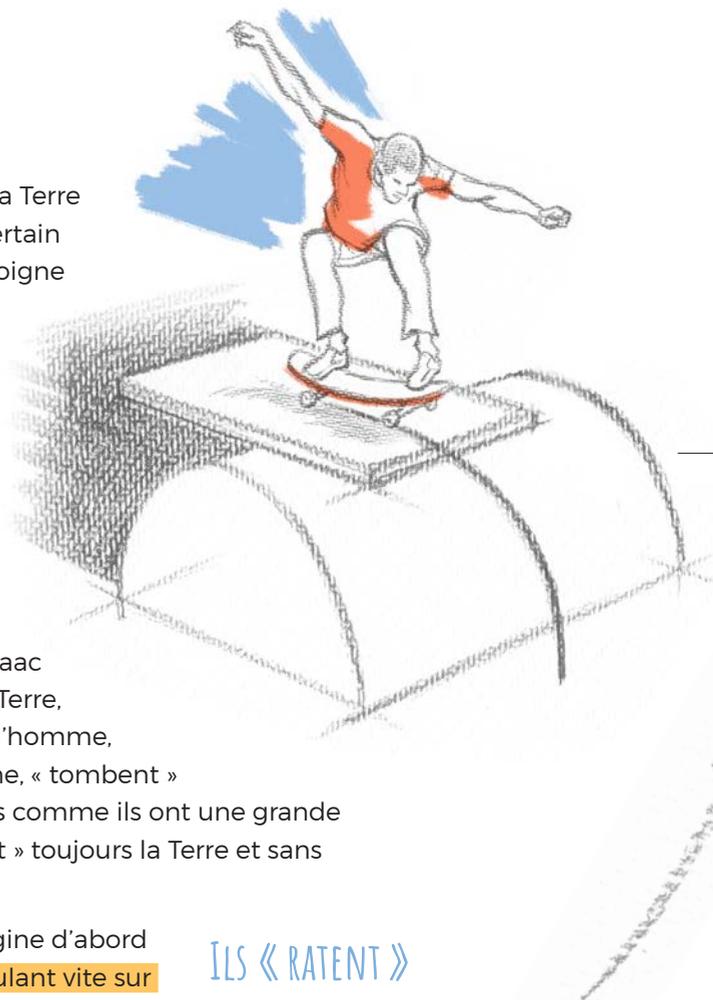
UNE GROSSE
PARTIE DE LA
FUSÉE RETOMBE
BIEN SUR LE
SOL OU PLUTÔT
EN MER

toujours, bien sûr, mais comme la Terre est ronde, et ça on en est bien certain depuis très longtemps, le sol s'éloigne de la trajectoire en ligne droite que le satellite aurait suivie s'il ne tombait pas (ligne en pointillé). Du coup l'altitude du satellite au dessus du sol reste la même : **la hauteur dont il a chuté est la même que l'éloignement du sol dû à ce que la Terre est ronde.**

C'est une grande découverte d'Isaac Newton : tous les satellites de la Terre, artificiels, c'est-à-dire lancés par l'homme, mais aussi naturel comme la Lune, « tombent » en permanence sur la Terre, mais comme ils ont une grande vitesse parallèle au sol, ils « ratent » toujours la Terre et sans arrêt tournent autour d'elle.

Pour mieux le comprendre, imagine d'abord que tu sois sur **un skateboard roulant vite sur un trottoir** et qu'arrivé au bord tu sautes en avant : très rapidement les roues de ton skate toucheront le sol de la rue qui se trouve un peu plus bas que le trottoir. Maintenant imagine que le trottoir soit posé sur un grand demi-cylindre comme sur la figure ci-dessus.

Alors quand tu arriveras au bord du trottoir, tu commenceras à chuter mais tu ne toucheras pas le cylindre si ta vitesse au départ est assez grande.



ILS « RATENT »
TOUJOURS
LA TERRE ET
SANS ARRÊT
TOURNENT
AUTOUR D'ELLE

Si tu as la bonne vitesse, tu pourrais même rester presque tout le temps très près du cylindre, un peu au-dessus de lui, mais sans jamais le toucher. **C'est à peu près ce qu'il se passe pour les satellites**, mais comme le rayon de la Terre est très grand, il faut que la vitesse du satellite soit très importante pour que sa trajectoire reste au dessus de la surface de la Terre.

TU NE
TOUCHERAS PAS
LE CYLINDRE
SI TA VITESSE
AU DÉPART EST
ASSEZ GRANDE

Expérience :

Bien sûr, on ne va pas mettre en orbite un satellite, mais on va essayer de montrer que si l'on lance un objet horizontalement, il va suivre une courbe qui ressemble à celles de la figure précédente, c'est-à-dire en s'arrondissant de plus en plus.

Pour cela, on va utiliser un téléphone portable et on va simplement filmer devant un mur clair la trajectoire d'une balle colorée pas trop légère (pas une balle de ping-pong, par exemple) : une balle rebondissante par exemple, ou un gros calot (mais bien protéger le sol avec un tapis dans ce cas, sinon gare au carrelage !). Pour avoir une belle trajectoire, il faut que le téléphone soit bien calé contre un support, que le cadre de l'image arrive jusqu'au sol, et que la balle soit lancée depuis une plateforme en hauteur, par exemple en empilant deux tabourets. Il faut frapper horizontalement la balle posée sur le tabouret supérieur, d'un coup sec avec une baguette, après avoir démarré l'enregistrement du film. Il faut ensuite pouvoir extraire des images du film. Fais-toi



aider pour cela, car il faut un ordinateur. Moi par exemple j'ai utilisé les applications gratuites VLC pour extraire les images du film, et ImajeJ pour superposer toutes les images de façon à ce que l'on voit toute la trajectoire sur une seule image, comme sur la figure ci-dessus.

Si l'on examine bien cette trajectoire, elle est faite de petits traits séparés entre eux, c'est parce que chacune des photos a été prise pendant un temps très court, toujours le même, puis enregistrée dans le smartphone. C'est le temps de l'enregistrement durant lequel on ne prend pas de photos qui sépare les traits. On voit bien que la courbe suivie par la bille n'est pas rectiligne et s'arrondit. On voit aussi que les petits traits deviennent de plus en plus longs car la bille va de plus en plus vite vers le bas.

Essaie d'imaginer maintenant que tu as une force considérable et que tu donnes une telle vitesse à la balle qu'elle suive une trajectoire comme celle en bleu sur la figure précédente. Eh bien tu l'aurais satellisée!

Ce n'est bien sûr pas réalisable en pratique, car cette force on ne l'a pas : il faudrait atteindre la vitesse de presque 30 000 km/h, et surtout l'air freinerait très vite la balle. C'est la raison pour laquelle les fusées doivent d'abord sortir de l'atmosphère pour ensuite s'incliner horizontalement et pousser les satellites jusqu'à ce qu'ils atteignent cette très grande vitesse qui leur permet de ne plus retomber au sol.

En résumé, un satellite est bien soumis à la force de gravitation comme tout objet proche de la Terre, mais il ne retombe pas sur le sol car il va tellement vite que, bien qu'il chute, il rate toujours la Terre qui est ronde.

LES FUSÉES
DOIVENT
D'ABORD SORTIR
DE L'ATMOSPHÈRE



V

L'APESANTEUR

Tu as sûrement vu à la télévision des séquences où des astronautes dans la Station Spatiale Internationale qui tourne en orbite autour de la Terre, semblent flotter sans toucher le sol de la station et sans faire d'effort. On a notamment beaucoup vu l'astronaute français **Thomas Pesquet** faire des démonstrations de cet état qu'on appelle l'apesanteur, effectuant des cabrioles ou jouant avec des objets qui semblent eux aussi flotter en l'air.

UNE TELLE TRAJECTOIRE S'APPELLE UNE PARABOLE

Comment cela est-il possible ? Pourquoi ne retombent-ils pas sur le plancher de la station ?

On entend souvent dire que c'est parce qu'ils sont loin de la Terre et qu'il n'y a plus de gravité, c'est à dire qu'il ne sont plus attirés par la masse de la Terre, comme nous et tous les objets autour de nous. Ce n'est pas exact : ils ne sont qu'à 400 km d'altitude et l'attraction de la Terre est pratiquement aussi importante que pour nous. La grande différence est qu'ils sont à l'intérieur de la station internationale qui avance avec une très grande vitesse sur son orbite, comme on vient de le voir juste avant. Je t'ai expliqué qu'en réalité la station, comme tout

satellite, « tombe » en permanence, mais qu'elle va assez vite pour que la hauteur dont elle chute soit exactement égale à l'éloignement du sol sous sa trajectoire, du fait que la Terre est ronde : c'est la trajectoire bleue de la figure.

Les habitants de la Station Spatiale Internationale sont exactement dans la même situation que la station elle-même : ils tombent eux aussi exactement en même

temps qu'elle et de la même façon et donc ont l'impression d'être immobiles par rapport à elle. Imagine un événement que je ne te souhaite surtout pas : tu es dans un ascenseur dont le câble casse brutalement. Eh bien tu te retrouverais dans la même situation que les astronautes : durant quelques secondes tu flotterais dans la cabine parce qu'elle et toi

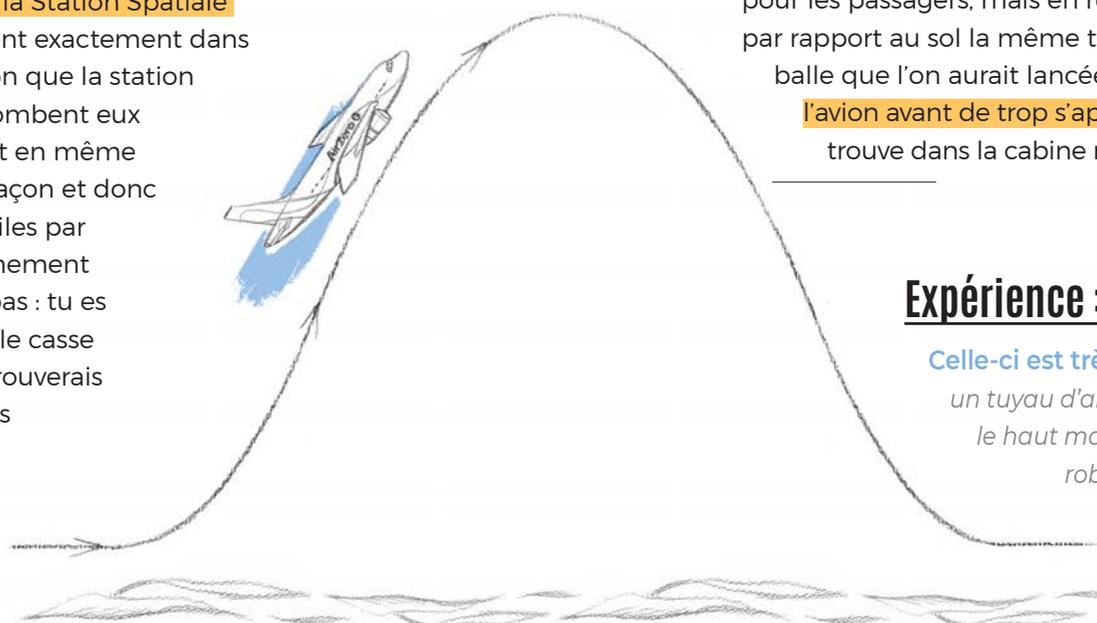
vous seriez ensemble en chute libre. Heureusement des freins entreraient en action et ralentiraient la chute de la cabine avant qu'elle ne s'écrase, c'est prévu dans tous les ascenseurs.

Il existe en France une expérience dans un avion qui reproduit régulièrement une chute de ce type pour entraîner les futurs astronautes ou faire des expériences en apesanteur : il s'agit d'un avion Airbus spécialement équipé qu'on appelle *Airbus 0-g*.

Le pilote fait suivre à l'avion une trajectoire de vol qui est exactement semblable à celle d'une balle - de tennis par exemple - que l'on lancerait vers le haut mais pas à la verticale : cette trajectoire s'incurve de plus en plus, devient horizontale très brièvement avant de redescendre. La figure ci-dessous décrit une telle trajectoire que l'on appelle une parabole. Tout ce qui se trouve dans l'Airbus, personnes comme objets, va alors se mettre à flotter dans la cabine qui semble immobile pour les passagers, mais en réalité tous sont en train de suivre par rapport au sol la même trajectoire en parabole, comme la balle que l'on aurait lancée. Bien entendu le pilote redresse l'avion avant de trop s'approcher du sol et tout ce qui se trouve dans la cabine retombe sur le plancher de celle-ci.

Expérience :

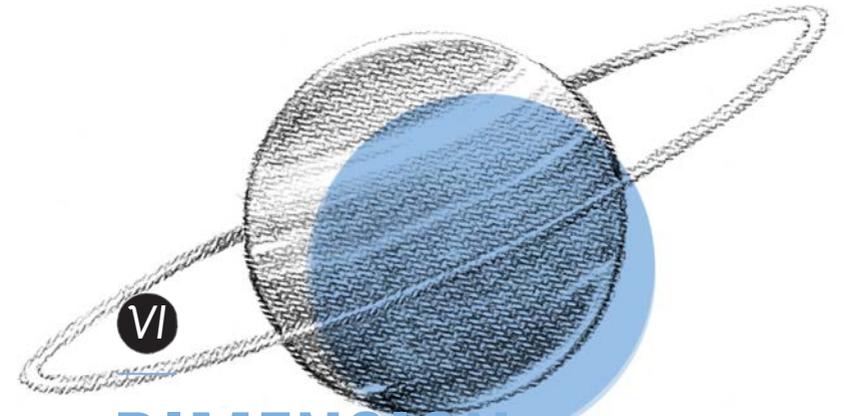
Celle-ci est très facile à faire, il suffit de prendre un tuyau d'arrosage, de lever l'embout vers le haut mais pas à la verticale et d'ouvrir le robinet : on voit alors très bien la courbe en parabole que suit l'eau



TU FLOTTERAIS
DANS LA CABINE
PARCE QU'ELLE ET
TOI VOUS SERIEZ
ENSEMBLE EN
CHUTE LIBRE

qui sort du tuyau. Elle monte, ralentit, avance un tout petit moment horizontalement et redescend en allant de plus en plus vite. Imagine maintenant une petite coccinelle qui serait emportée par le jet. Eh bien elle aurait l'impression de flotter au milieu du jet sans bouger par rapport à l'eau autour d'elle, comme les astronautes dans la station spatiale. Bien sûr je ne te propose pas de chercher une coccinelle et de l'introduire dans le jet, ce ne serait pas très sympathique pour elle, même si elle n'en mourrait probablement pas. Si tu n'as pas accès facilement à un tuyau d'arrosage, tu peux essayer dans la douche en démontant la pomme de douche de son tuyau, mais il faudra bien faire attention d'ouvrir le robinet très doucement pour ne pas mettre d'eau partout.

En résumé, l'apesanteur n'est pas l'absence de gravité mais le fait de se trouver durant un moment assez long dans une cabine (d'avion ou de station spatiale en orbite) en chute libre : comme les passagers, la cabine et tous les objets qui sont dedans tombent de la même façon, les passagers ont l'impression de flotter.



DIMENSION DE LA TERRE

Quelle est la taille de l'espace ? C'est une question que tu t'es peut-être posée et en tout cas que bien des personnes se sont posée dans l'histoire.

C'est une question dont la réponse n'est pas facile si l'on cherche à définir la taille de tout l'Univers, mais dans ce livre, on va juste essayer d'avoir une idée sur la taille de notre monde local que l'on appelle le système solaire et tu verras déjà qu'il est bien grand.

Déjà la taille de la Terre : **comment la mesurer ?** Un savant grec nommé Ératosthène, il y a bien longtemps, a réussi. Il avait remarqué que le 21 juin quand le soleil est au plus haut dans le ciel

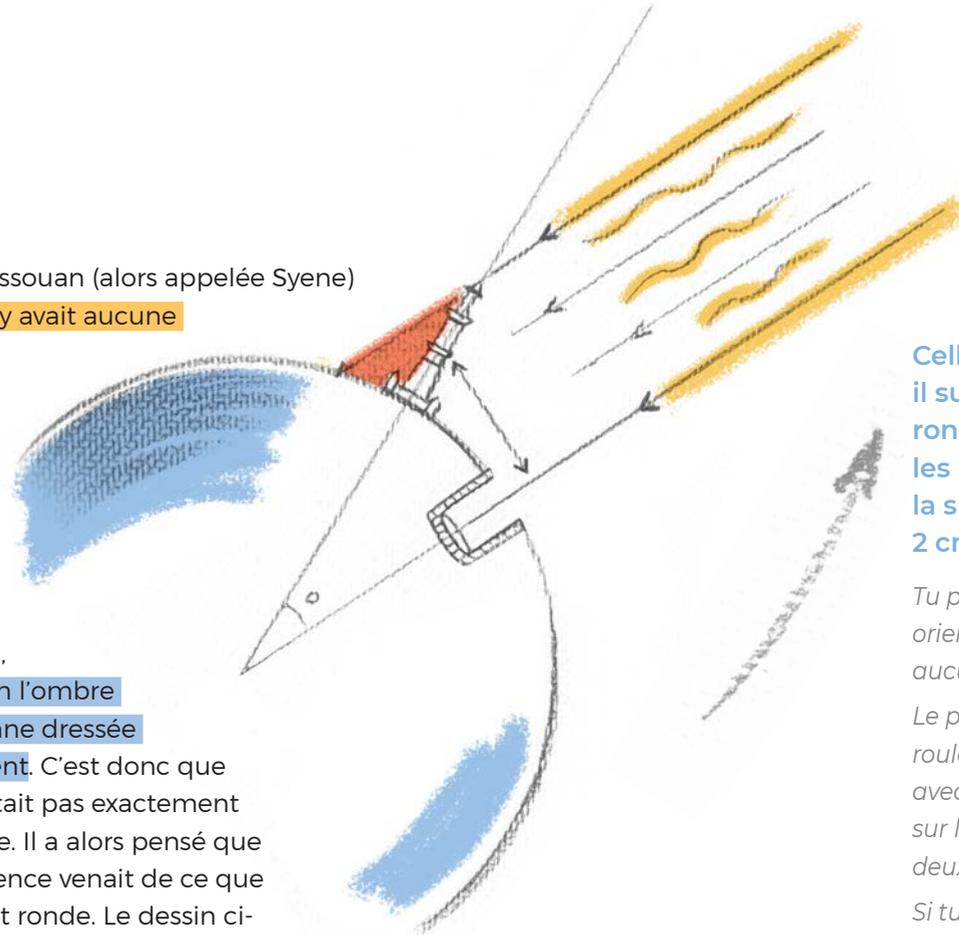
à midi, dans la ville d'Assouan (alors appelée Syene) au sud de l'Égypte, il n'y avait aucune ombre dans un puits, autrement dit le soleil était exactement à la verticale. Or, ce même jour, dans sa ville d'Alexandrie, aussi située en Égypte mais bien plus au nord,

il voyait bien l'ombre d'une colonne dressée verticalement. C'est donc que le soleil n'était pas exactement à la verticale. Il a alors pensé que cette différence venait de ce que la Terre était ronde. Le dessin ci-dessus illustre son raisonnement.

CETTE DIFFÉRENCE VENAIT DE CE QUE LA TERRE ÉTAIT RONDE

En mesurant la taille de l'ombre de la colonne et connaissant la taille de celle-ci, il a pu calculer l'angle que faisait la direction du soleil par rapport à la verticale à Alexandrie. Comme par ailleurs il avait une bonne idée de la distance entre les deux villes d'Assouan et d'Alexandrie, il a pu calculer le rayon de la Terre.

On s'est rendu compte qu'il était vraiment très grand : 6400 km ! Comme on a pu alors calculer le volume de la Terre, on a pu avoir une idée de sa masse qui est effectivement énorme.



Expérience :

Celle-ci est assez simple : il suffit de planter deux épingles avec une tête ronde en plastique dans une balle de mousse en les piquant bien droites perpendiculairement à la surface de la balle et en les séparant d'environ 2 cm.

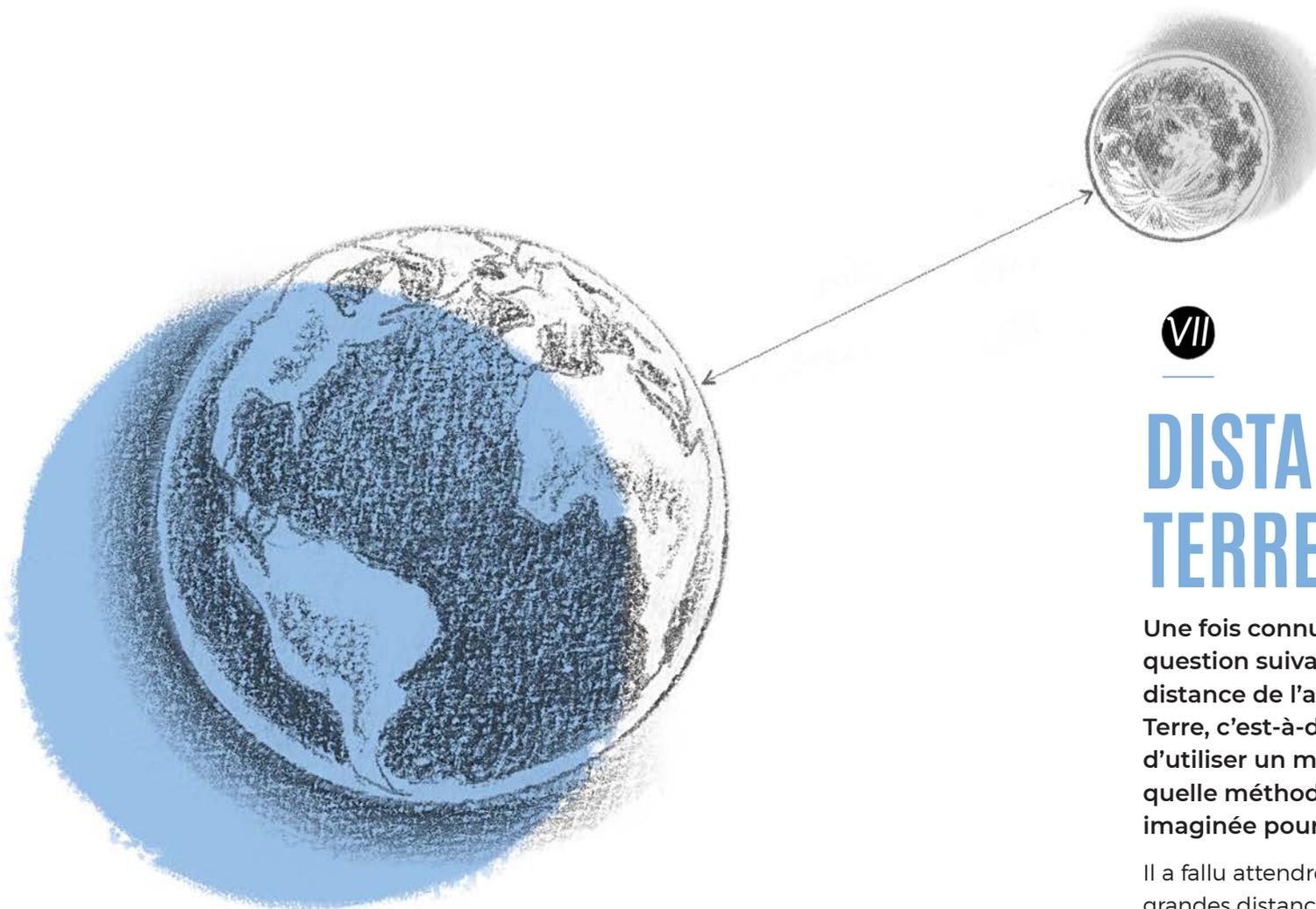
Tu présentes alors la balle au soleil avec une des épingles orientée du mieux possible vers le soleil et donc n'ayant aucune ombre.

Le plus simple est de poser la balle sur une table et de la faire rouler pour bien positionner l'épingle. Tu peux alors mesurer avec un double décimètre l'ombre de la deuxième épingle sur la balle, la hauteur de l'épingle et la distance entre les deux points où sont enfoncées les épingles.

Si tu fais le calcul suivant : $\text{distance} \times \text{ombre} / \text{hauteur}$, tu devrais trouver une valeur assez proche du rayon de la balle, ce que tu peux vérifier en mesurant le diamètre de la balle, c'est-à-dire deux fois son rayon. Il suffit pour cela de mettre ton double décimètre vertical contre la balle et de descendre une équerre ou si tu n'en n'a pas sous la main, une boîte en carton (par exemple une boîte de mouchoirs en papier) en appui le long de la règle sur un petit côté, jusqu'à toucher la surface de la balle (attention au décalage si la graduation sur le double décimètre ne commence pas juste au bord : il faudra le mesurer et en tenir compte).



Résumé : on a pu mesurer la taille de la Terre en comparant le même jour dans deux villes distantes l'une de l'autre, les ombres de colonnes verticales.



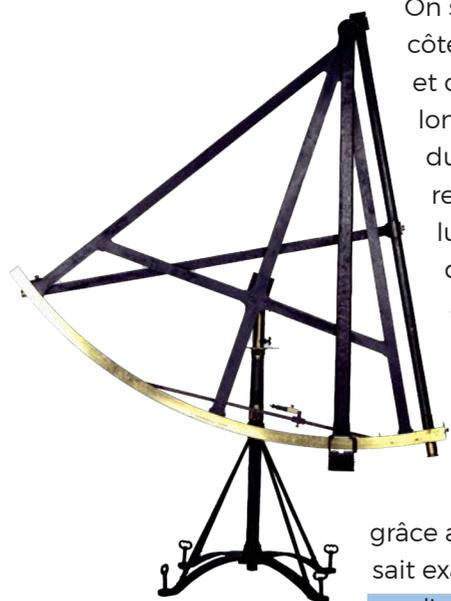
VII

DISTANCE TERRE-LUNE

Une fois connu le rayon de la Terre, la question suivante a été quelle est la distance de l'astre le plus proche de la Terre, c'est-à-dire la Lune ? Pas question d'utiliser un mètre-ruban bien sûr, alors quelle méthode les hommes ont-ils imaginée pour faire cette mesure ?

Il a fallu attendre que les voyages sur de grandes distances soient possibles et c'était le cas au 18^{ème} siècle. Deux astronomes français, nommés Lalande et Lacaille, se sont mis d'accord : l'un irait à Berlin en Allemagne et

l'autre irait au Cap de Bonne-espérance qui est le point le plus au sud de l'Afrique et ils observeraient le même jour la Lune en mesurant à quelle hauteur elle était au-dessus de l'horizon. **La hauteur, c'est un angle sur le ciel** que l'on compte depuis l'horizon et que l'on peut mesurer avec une sorte de grand rapporteur munie d'une longue-vue (une sorte de télescope), comme sur la photo suivante.



On s'assure que l'un des côtés est bien vertical et on fait bouger la longue-vue le long du cadran gradué en regardant dans la lunette, jusqu'à ce qu'un bord de la Lune soit bien visible au centre de l'oculaire (là où l'on met l'œil au bout de la longue-vue). Si l'on fait ensuite la même chose en regardant cette fois une étoile à côté de la Lune, on va devoir faire un peu tourner la longue-vue et grâce aux graduations du rapporteur, on sait exactement de combien : **c'est un angle que l'on mesure en degrés.**

REGARDE UNE ÉTOILE À CÔTÉ DE LA LUNE

Les deux astronomes ont fait chacun cette mesure et ont trouvé des valeurs un peu différentes.

Pourquoi ?

Et bien, tu as sûrement déjà observé cet effet : si tu regardes un objet proche, disons à 50 centimètres comme **ton pouce au bout de ton bras tendu**, et qu'il y a beaucoup plus loin

un paysage, par exemple des arbres et que tu regardes alternativement de l'œil gauche et de l'œil droit en fermant l'autre œil, tu as l'impression que l'objet se déplace par rapport au paysage.



Avec l'œil gauche



Avec l'œil droit

Tes yeux sont séparés de 6 cm environ et donc la ligne qui va de ton œil droit à ton pouce et celle qui va de ton œil gauche à ton pouce ne rencontrent pas le même arbre distant.



TON POUCE C'EST LA LUNE

Pour la mesure faite par les astronomes, c'est un peu la même chose : la distance que l'on va appeler D qui sépare Cap Bonne-Espérance de Berlin c'est l'équivalent de la distance entre tes yeux et l'objet « proche » qui remplace ton pouce, c'est la Lune, tandis que **le paysage très lointain c'est le champ d'étoiles autour de la Lune.**

DISTANCE
TERRE-LUNE
384 000 KM



Les deux astronomes ont alors fait la soustraction entre les deux angles a et b que chacun a mesuré entre un point de la Lune et une étoile à côté de celle-ci, puis ils ont fait la division : $D = (a - b)$ et cela leur a donné la distance Terre-Lune, soit 384 000 km. Pas mal, non ?

Note que l'angle doit être exprimé non pas en degrés comme tu as sans doute l'habitude de le faire, mais en radians qui est une autre unité: **il faut juste savoir qu'un radian c'est $57,3^\circ$.**

Expérience :

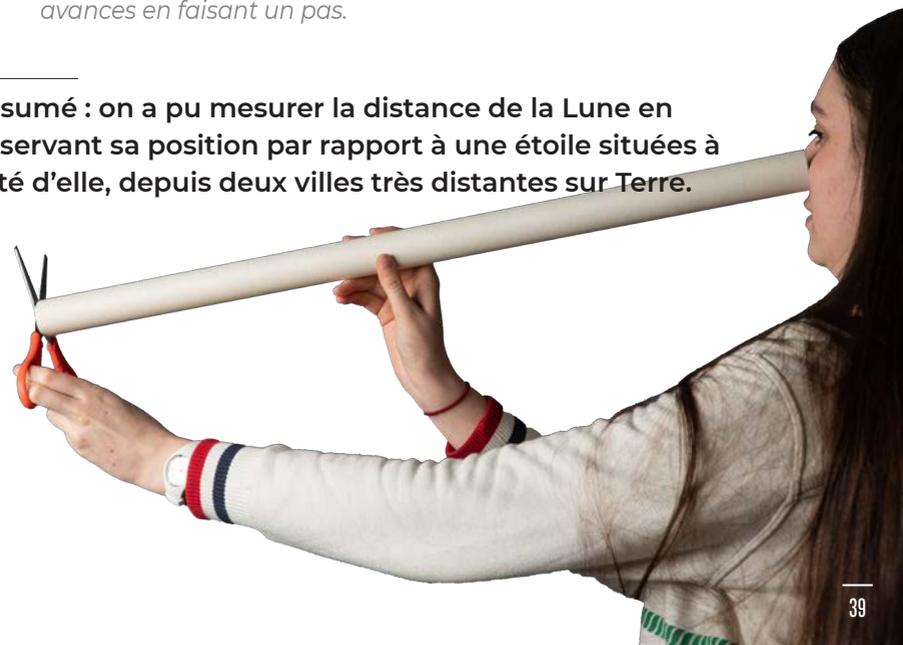
En utilisant la même méthode que Lalande et Lacaille, tu peux mesurer la distance d'un objet un peu distant (un lampadaire, un arbre, vu par la fenêtre) sans quitter ta chambre.

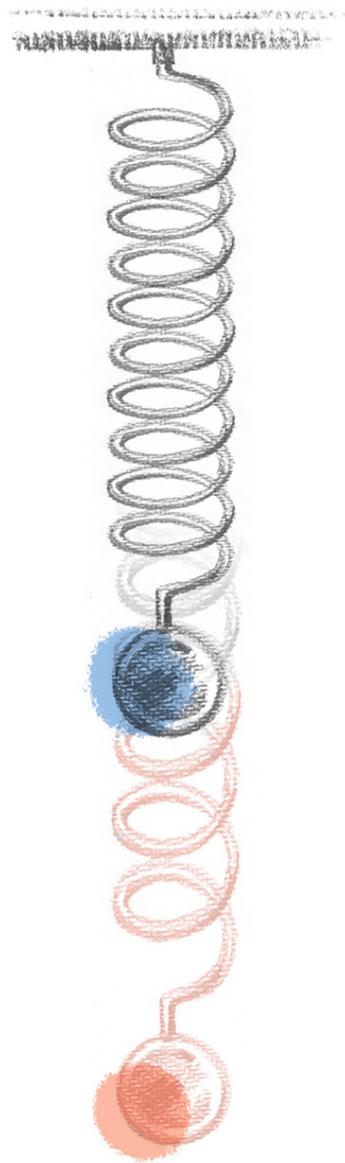
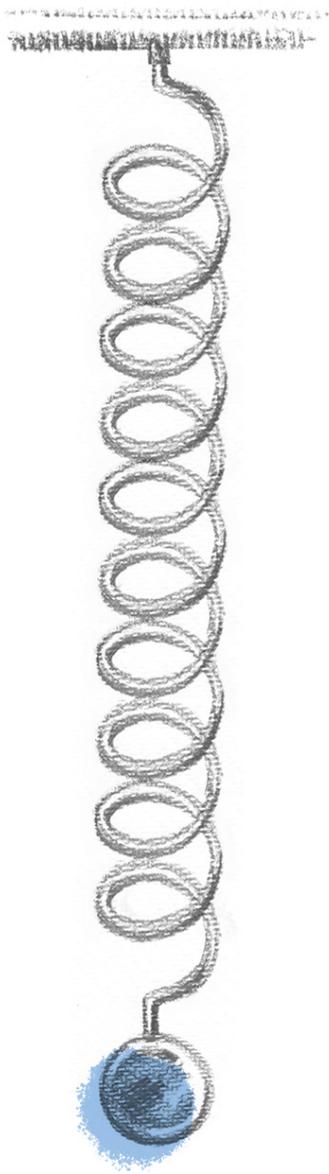
Place toi devant une fenêtre ou sors dehors et tiens une paire de ciseaux au bout d'une règle ou d'un bout de tasseau de 30 cm en faisant un peu dépasser les pointes au dessus de la règle et applique l'autre extrémité de la règle juste sous un œil, comme sur le schéma ci-contre.

Tiens toi les pieds joints au dessus d'un repère sur le sol (un crayon posé, par exemple) et règle l'écartement des pointes de la paire de ciseaux pour que l'une soit superposée à l'objet que tu as choisi et l'autre à un point très distant (un immeuble ou une colline au loin par exemple) que tu verras en même temps. Mesure l'écart entre les deux pointes avec un double décimètre et note-le. Il doit être de quelques cm au plus. Déplace toi sur le côté sur un autre repère que tu auras préparé et distant du premier de 50 cm et recommence la mesure en écartant les pointes du ciseau d'une distance qui sera forcément un peu différente. Il suffit alors de faire la soustraction des deux mesures qui donnera une valeur en cm qu'on appellera d .

Le résultat du calcul $0,5 \times 30 / d$ te donne la distance de l'objet en mètres, avec une assez bonne approximation. Il ne te reste plus qu'à vérifier que c'est bien vrai en mesurant à quelle distance l'objet est effectivement, en comptant tes pas pour y arriver et en mesurant avec un mètre de combien tu avances en faisant un pas.

Résumé : on a pu mesurer la distance de la Lune en observant sa position par rapport à une étoile situées à côté d'elle, depuis deux villes très distantes sur Terre.

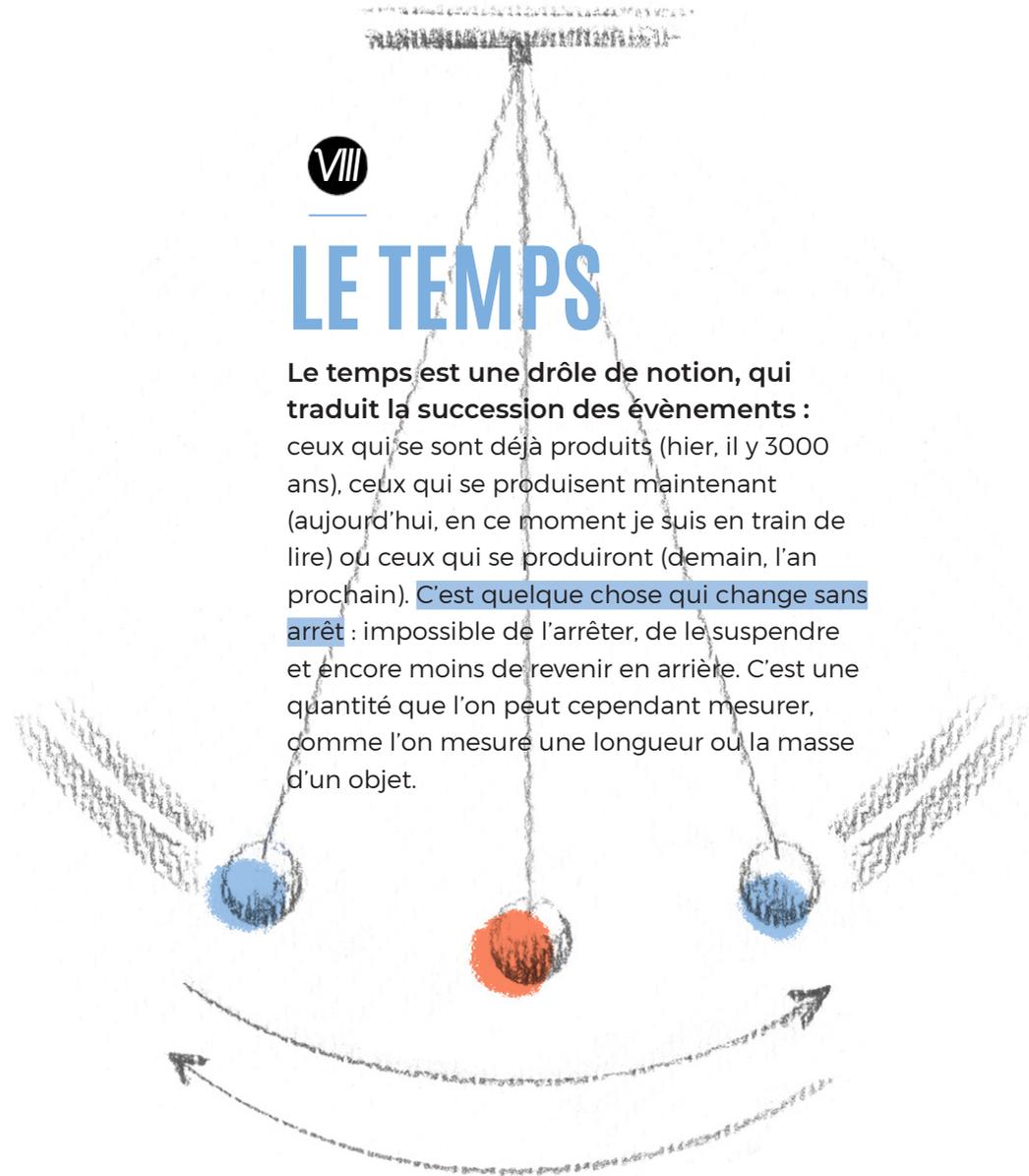




VIII

LE TEMPS

Le temps est une drôle de notion, qui traduit la succession des évènements : ceux qui se sont déjà produits (hier, il y a 3000 ans), ceux qui se produisent maintenant (aujourd'hui, en ce moment je suis en train de lire) ou ceux qui se produiront (demain, l'an prochain). C'est quelque chose qui change sans arrêt : impossible de l'arrêter, de le suspendre et encore moins de revenir en arrière. C'est une quantité que l'on peut cependant mesurer, comme l'on mesure une longueur ou la masse d'un objet.



Il y a des phénomènes qui reviennent régulièrement : le lever du soleil, le balancement d'une bille au bout d'un ressort, la vibration d'une corde de guitare, un jour chaque année au début de l'été où la durée du jour est maximum.

Si l'on suppose que la durée entre deux de ces événements est toujours la même, alors en comptant le nombre d'évènements, on peut avoir une mesure du temps qui s'est écoulé entre le début et la fin d'un phénomène (comme un temps de cuisson au micro-onde) ou d'une action (durée d'utilisation de la tablette fixée par les parents, durée d'un match de foot ou d'une récréation à l'école).

On appelle horloge un appareil qui permet de compter ainsi des événements répétitifs. On a perfectionné les horloges au cours des siècles pour qu'elles soient de plus en plus précises : ta montre ou un smartphone te donne l'heure avec une très grande précision, bien suffisante pour ne pas arriver en retard à l'école ou pour que l'arbitre siffle l'arrêt d'un match de foot exactement après une heure et trente minutes de jeu.

Si tu veux surprendre tes parents, tu pourras leur affirmer

que les chercheurs ont fabriqué dans leur laboratoire des horloges qui ont aujourd'hui une précision absolument extraordinaire : au bout de 130 milliards d'années, elles ne se tromperaient que d'une seconde ! Cela n'est pas très utile pour la vie de tous les jours, mais cela permet de réaliser des expériences en science qui conduiront à des nouveaux progrès.

TA MONTRE OU UN
SMARTPHONE TE
DONNE L'HEURE
AVEC UNE TRÈS
GRANDE PRÉCISION

SURPRENDS
TES PARENTS

Expérience :

Pour illustrer cette mesure du temps en comptant des événements réguliers, tu peux te fabriquer une horloge assez simplement avec une bouteille d'eau en plastique, en perçant son bouchon d'un tout petit trou avec une épingle et en faisant un autre trou dans le fond pour que l'air puisse passer.

En remplissant d'eau la bouteille, puis en la retournant sur une autre bouteille coupée, des gouttes se mettront à tomber de façon régulière.

Il suffit de les compter pour faire des mesures de temps.

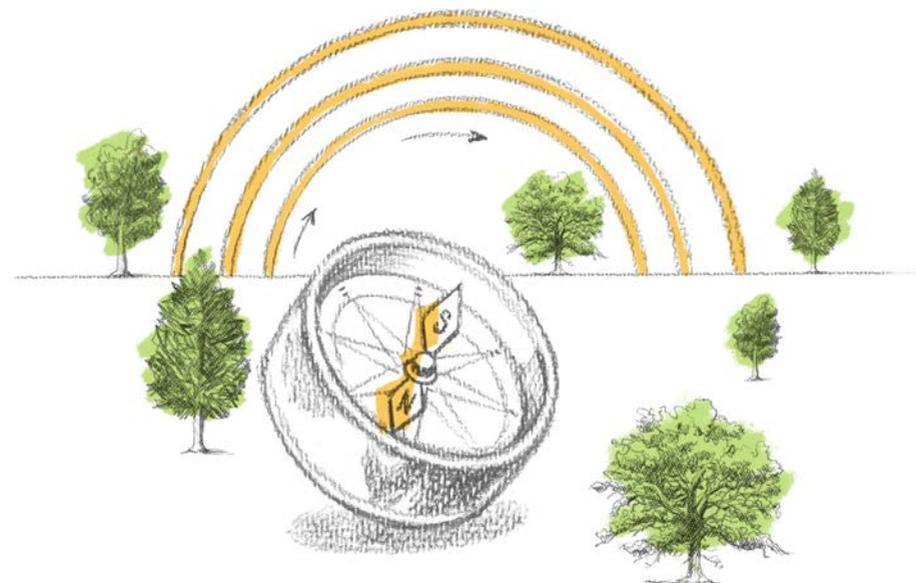
Cependant, si tu mesures à l'aide d'une montre ou d'un smartphone, combien de gouttes tombent en une minute, tu constateras que ce nombre varie suivant que la bouteille est pleine ou presque vide. C'est parce que plus il y a d'eau et plus la pression sur le petit trou est forte et plus les gouttes sortent vite. Pour avoir un débit constant, il faudrait que le niveau dans la bouteille soit toujours le même. On peut le faire en utilisant une deuxième bouteille coupée, dont le bouchon a aussi été percé d'un trou d'épingle et qui est remplie par la première bouteille plus vite qu'elle ne se vide. Un gros trou dans le haut de la deuxième bouteille permet qu'elle déborde et maintienne son niveau.

Le schéma ci-dessus te montre comment faire.



On peut mettre un petit tuyau (un bout de tube de stylo à bille par ex) dans le trou du trop-plein pour guider l'eau bien à l'extérieur du montage. Il faut bien ajuster les trous d'épingle pour que la bouteille du haut coule un peu plus vite. Il faut aussi que l'air puisse sortir de la bouteille du bas : on glisse un petit bout de carton entre elle et celle au-dessus. On peut graduer le récipient du bas en faisant au feutre un petit trait au niveau du liquide toutes les 15 minutes, par exemple. On peut aussi compter le nombre de gouttes par minute pour servir de base si l'on veut mesurer des temps assez courts, comme la cuisson d'un œuf à la coque. Cela permettra de vérifier que ce nombre de gouttes ne varie pas quand le niveau dans la bouteille supérieure change du maximum au minimum.

Résumé : le temps se mesure en comptant des évènements qui se reproduisent très régulièrement.



IX

DURÉE DU JOUR : 24 HEURES ?

Généralement on compte en secondes les durées assez courtes, mais les physiciens mesurent parfois des durées beaucoup plus petites comme des flashes de lumière de laser qui durent une picoseconde, c'est à dire une seconde divisée par mille milliard !

A l'inverse, les temps très longs seront mesurés en jours, en mois, en années, en siècles, en millénaires... Les astronomes ont été ceux qui ont permis de déterminer précisément

combien de secondes il y a dans une journée, combien de journées dans une année. Ce n'est pas si évident que cela en a l'air.

Par exemple, on sait qu'une journée, c'est 24 heures et qu'en principe c'est le temps qui s'écoule entre deux passages du soleil au plus haut de sa trajectoire dans le ciel, vers midi.

J'ai écrit vers midi, car ce n'est que très rarement exactement à midi qu'il est le plus haut. Il y a deux raisons à cela.

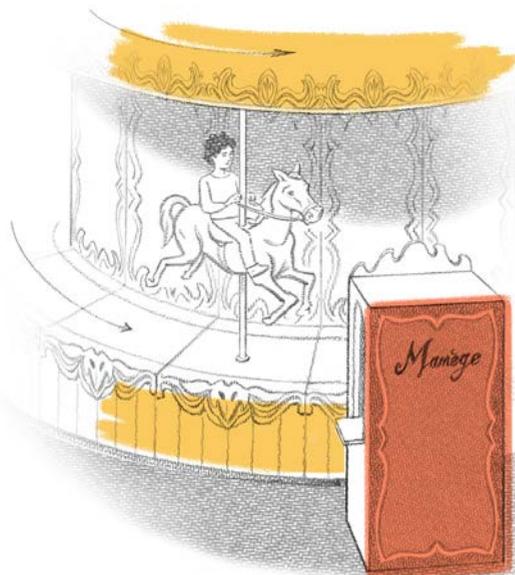
La première est liée à la région où l'on vit. En fait, l'heure à notre montre est la même partout en France, c'est plus commode, par exemple pour voyager ou regarder une émission à la télé. En réalité, suivant que l'on habite plus à l'Est (en

Alsace par exemple) ou plus à l'Ouest (en Bretagne), le soleil ne passera pas au plus haut à la même heure de la montre : ce sera plus tôt à l'Est qu'à l'Ouest. Par exemple s'il est haut à

13h40 à Strasbourg en Alsace, il ne sera au plus haut qu'à 14h15 à Brest en Bretagne. C'est parce que le passage du soleil est en fait dû à ce que la Terre tourne sur elle-même comme un gigantesque manège sur lequel nous sommes.

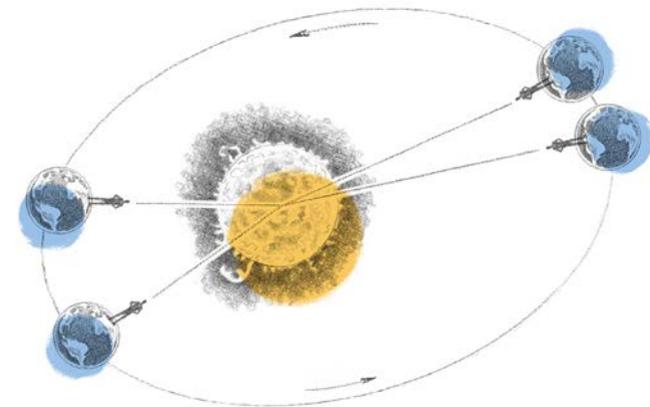
Quand tu es sur un manège, la cabine du vendeur de billets est un peu comme le soleil, sauf que là, elle se lève, passe juste devant toi, puis se couche

LE SOLEIL EST AU PLUS HAUT DE SA TRAJECTOIRE VERS MIDI



toutes les 30 secondes ! Et si ton frère ou ta sœur est à un autre endroit du manège, vous passerez devant la cabine à des moments différents séparés par quelques secondes. C'est le même effet que pour les habitants de Brest et de Strasbourg.

La deuxième raison c'est que la durée entre deux passages du soleil au plus haut n'est pas toujours exactement 24 heures. Cela vient de ce que que la Terre, en plus de tourner sur elle-même, se promène autour du soleil le long d'un cercle presque parfait qu'elle parcourt en une année. J'ai écrit presque parce que ce cercle est plutôt un ovale comme le montre la figure.



Or la Terre va plus vite quand elle est dans la partie la plus proche du soleil et moins vite quand elle est dans la partie la plus éloignée du soleil. D'un jour à l'autre, le moment où le soleil est au plus haut est un petit peu en avance ou en retard par rapport à 24 heures, suivant qu'on se trouve près du

LA TERRE, EN PLUS DE TOURNER SUR ELLE-MÊME, SE PROMÈNE AUTOUR DU SOLEIL

premier point ou du deuxième. C'est un peu comme si la cabine du manège était montée sur un chariot et faisait des petits aller-retours très lentement : quand elle va dans le même sens que le manège, pour repasser exactement devant elle tu dois faire un peu plus qu'un tour de manège et quand elle va en sens inverse du manège, alors tu dois faire un peu moins d'un tour. Pour la Terre, il peut y avoir jusqu'à une demi-heure de différence entre l'heure à laquelle le soleil passe au plus haut en hiver et en été.

LA TERRE VA
MOINS VITE
QUAND ELLE EST
DANS LA PARTIE
LA PLUS ÉLOIGNÉE
DU SOLEIL

Expérience :

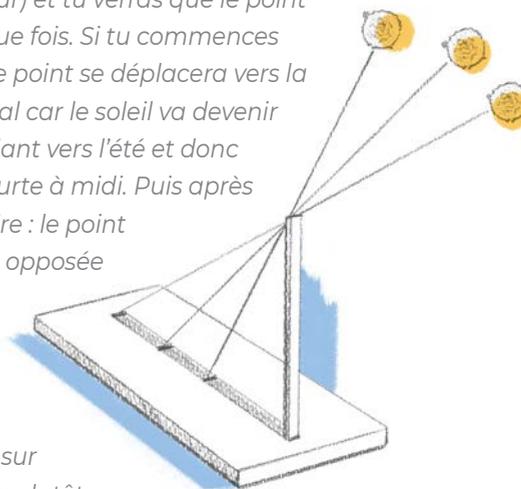
Avec un peu de patience, tu pourrais facilement mesurer ce curieux effet. Le matériel est simple : il suffit d'enfoncer verticalement une longue tige d'environ 30 cm (par ex un tuteur de plante) dans un trou bien ajusté, près de l'extrémité d'une planchette d'une quarantaine de cm, comme par exemple une lame de parquet.

Dans un endroit bien exposé au soleil, dans le jardin, sur un balcon, la planchette doit être posée le long de la direction Nord-Sud. Tu peux déterminer cette direction à l'aide d'une boussole ou avec un smartphone. Il faut que la baguette soit du côté Sud. Il ne faudra plus bouger la planchette pendant des mois ou alors prendre des repères très précis pour la repositionner à chaque observation.



Le premier jour où le soleil est bien présent, à exactement 13h en hiver et 14h en été, tu notes sur la planchette, avec un feutre, le point où se trouve l'ombre de la pointe du haut de la tige. Tu recommences tous les jours où il y a du soleil (il faut de la patience, c'est sûr) et tu verras que le point se déplace un peu à chaque fois. Si tu commences après Noël, par exemple, le point se déplacera vers la base de la tige, c'est normal car le soleil va devenir de plus en plus haut en allant vers l'été et donc l'ombre de plus en plus courte à midi. Puis après le 21 juin, ce sera le contraire : le point repartira dans la direction opposée car l'ombre va être de plus en plus longue.

Mais ce qui est plus surprenant c'est que le point ne se déplacera pas sur une ligne toute droite mais plutôt sur une ligne un peu sinueuse en S qui sera quelques mois d'un côté et les mois suivants de l'autre côté de cette ligne droite. C'est à cause de l'effet que je viens de décrire. Tu as déjà dû voir des cadrans solaires : la plupart



présente une telle ligne sinueuse dessinée sur leur plateau comme celui sur la photo. Examine bien le prochain que tu rencontreras.

En réalité, il y a un deuxième phénomène qui se rajoute à celui que je viens de te décrire et qui est dû à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur le plan de l'orbite de la Terre. C'est un peu plus compliqué et je ne le décrirai pas, mais si tu es intéressé tu peux rechercher sur internet des explications détaillées.

Résumé : un jour dure bien 24 heures, mais le moment où le soleil est au plus haut dans la journée n'est pas exactement à midi de notre montre, suivant l'endroit où l'on se trouve et suivant la date dans l'année.



Les astronomes qui ont permis de mesurer ces effets sur la durée du jour solaire, ont aussi mesuré la durée précise d'une année.

Une année, on sait que c'est 365 jours, sauf les années bissextiles, comme celle de 2020 où il y a 366 jours : on ajoute un 29 au mois de février. Cela paraît un peu bizarre à première vue, mais en fait, si l'on réalise qu'une année c'est le temps que met la Terre pour exactement revenir au même point de son chemin autour du soleil, alors on comprend bien qu'il n'y a aucune raison que cela corresponde très exactement à un nombre rond de jours, c'est à dire de tours sur elle-même de la Terre. Ne pas oublier qu'une journée, c'est juste un tour complet. En fait, quand la Terre revient exactement au même point sur son orbite, elle a fait 365 tours plus un quart de tour. C'est ce qu'indique la figure ci-dessus qui montre qu'après juste 365 jours, la Terre n'est pas tout à fait revenue à son point de départ sur sa trajectoire autour du soleil.

Or les saisons sont liées à la position de la Terre sur cette orbite. Ce n'est pas comme certaines personnes le croit à cause de la distance au soleil qui changerait, mais parce que l'axe autour duquel la Terre tourne est incliné sur le plan de cette orbite.

Si l'on ne rajoutait pas cette journée tous les quatre ans, alors tous les 365 jours, la Terre se retrouverait progressivement de plus en plus loin du point qui correspond à la saison réelle et on finirait par se retrouver avec Noël en plein été ! Cela prendrait du temps : 750 années. Heureusement les hommes se sont rendus compte de cela et ont eu cette idée des années bissextiles il y a bien longtemps déjà, sous Jules César, en 46 avant Jésus-Christ.

Pour ceux qui sont très curieux, on peut ajouter que, comme ce n'est pas exactement 365 jours un quart, mais plutôt 365,24 jours, on ne rajoute pas de 29 février l'année d'un siècle, sauf s'il est divisible par 400...

Par exemple en 2000, qui est divisible par 400, on a ajouté un 29 février, mais pas en 1900 et on ne le fera pas en 2100, une année que tu connaîtras probablement.

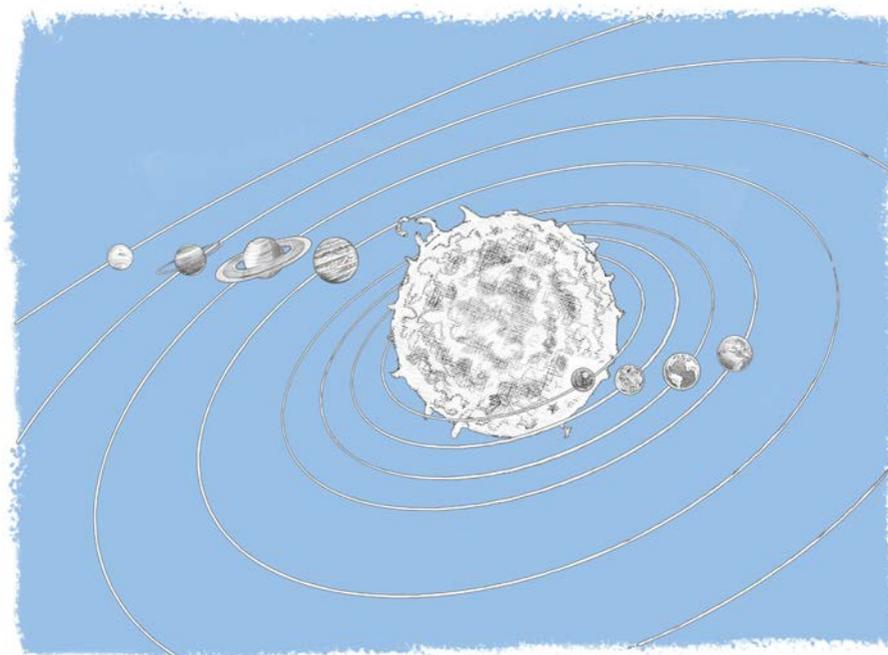
Résumé : pour qu'une date dans l'année corresponde toujours à des saisons précises (Noël en hiver par exemple), on a dû ajouter une journée en février tous les quatre ans : ce sont les années bissextiles.

LA TERRE FAIT
365 TOURS PLUS
UN QUART DE
TOUR

XI

LES « ANNÉES » DES PLANÈTES

Tu sais, parce que tu l'as appris à l'école, qu'il y a des planètes qui tournent autour du Soleil et que la Terre où nous habitons est l'une d'entre elles, la troisième si l'on compte à partir du Soleil.



CHAQUE PLANÈTE AVANCE SUR UNE COURBE AUTOUR DU SOLEIL

Chacune avance sur une courbe en forme d'ovale, très proche d'un cercle, autour du Soleil. Elle met un certain temps pour boucler un tour complet : c'est une année pour la Terre, mais c'est moins pour les planètes plus proches du Soleil comme Mercure et Vénus et c'est plus long pour celles qui sont plus éloignées.

Plus une planète est loin du Soleil et plus son « année » dure longtemps : c'est logique elle a plus de chemin à parcourir, mais en plus sa vitesse diminue avec l'éloignement du Soleil. Par exemple pour Jupiter qui est 5 fois plus éloignée du Soleil que la Terre, son « année » est de presque 12 années terrestres.

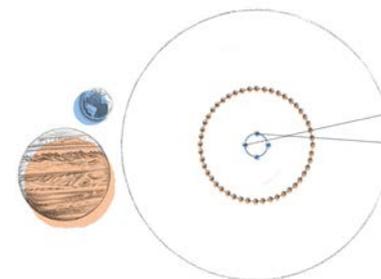
Ces durées, on a pu les mesurer assez simplement par l'observation régulière des planètes, une pratique commencée il y a très longtemps par beaucoup de civilisations dans le monde, en Asie et au Moyen-Orient en particulier. Quand on voyait revenir une planète dans la même région du ciel, que l'on repère par les étoiles qui elles ne bougent pas, on pouvait alors conclure qu'elle avait fait un tour complet du Soleil, à ceci près que comme la Terre avance aussi sur son orbite, il faut en tenir compte. Pour bien réaliser cela, je te propose de faire l'expérience suivante.

1 ANNÉE POUR
JUPITER EST DE
PRESQUE 12 ANNÉES
TERRESTRES

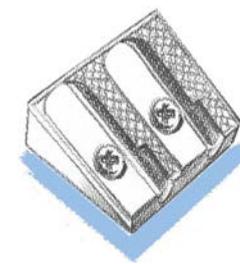
Expérience :

Trace sur un carton un grand cercle, puis à l'aide d'un rapporteur reporte un point au feutre tous le $7,5^\circ$: il doit y en avoir 48.

Mesure le rayon de ton cercle avec un double décimètre et avec un compas, trace un petit cercle de même centre, mais de rayon $1/5^{\text{ème}}$ du premier. Trace 4 points en croix sur le petit cercle. Enfin trace à l'aide du compas un cercle le plus grand possible sur ta feuille. Ton dessin doit ressembler à la figure :



Les points sur le grand cercle orange symbolisent Jupiter à différentes positions sur son orbite et sont bien 5 fois plus loin du Soleil, supposé au centre du cercle, que la Terre qui se déplace sur le petit cercle bleu. Maintenant on va simuler l'avance des deux planètes sur leur orbite, en faisant avancer à chaque fois d'un quart de tour la Terre (ce qui correspond à un trimestre) et en faisant passer Jupiter de marque en marque sur le grand cercle. Après chaque déplacement, tu poses une règle qui passe par les deux planètes et tu fais un petit trait au crayon fin sur le carton, là où la règle croise le cercle le plus extérieur en notant à côté le numéro du pas effectué : 1, 2, 3, ...





Tu verras rapidement que les points sur le cercle extérieur ne se suivent pas régulièrement mais sont tantôt serrés tantôt plus écartés et surtout tu verras que pour tracer la ligne suivante tu tourneras ta règle le plus souvent dans un sens mais parfois dans l'autre. Cela signifie que pour un observateur sur la Terre, Jupiter donne l'impression d'avancer dans une direction par rapport aux étoiles lointaines mais parfois de changer de sens, une fois sur trois, donc durant à peu près 3 mois.

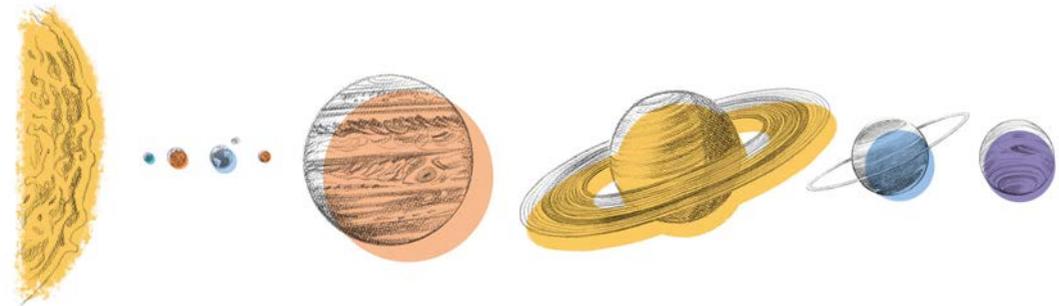
On voit aussi, si tu as la patience de faire avancer 48 fois Jupiter et la Terre, que la dernière ligne recoupe le cercle extérieur au point de départ, donc que pour un observateur sur Terre, Jupiter est revenu dans la même région du ciel et a donc fait un tour complet autour du Soleil. C'est ainsi qu'on a pu déterminer son « année ».

Pour chacune des planètes du système solaire, on a ainsi pu mesurer la durée du parcours d'une orbite complète, que l'on appelle *période orbitale* : c'est ce qui apparaît dans le tableau suivant, en années terrestres.

MERCURE	VENUS	TERRE	MARS	JUPITER	SATURNE	URANUS	NEPTUNE
0,24	0,62	1	1,9	11,9	29,5	84	165

On voit que pour les planètes les plus lointaines, une « année » dure très, très longtemps !

Résumé : les planètes tournent autour du soleil en mettant un temps d'autant plus long qu'elles sont éloignées du Soleil.



XII

POSITION DES PLANÈTES DU SYSTÈME SOLAIRE

Les observations du déplacement des planètes par rapport aux étoiles ont été accumulées pendant de très nombreuses années par plusieurs générations d'astronomes, en particulier par l'un d'entre eux nommé Tycho Brahe.

En les examinant en détail, un grand savant au 17^e siècle, Kepler, a pu obtenir plusieurs conclusions, en particulier que les orbites des planètes étaient proches d'un cercle autour du Soleil, mais un peu ovales (on dit que ce sont des ellipses) et toutes situées presque dans un même plan.

EN 1761 QUELQUES ASTRONOMES SE SONT RÉPARTIS SUR LES DIFFÉRENTS CONTINENTS EUROPE

Un autre résultat remarquable que découvrit Kepler, mais sans en donner d'explication est que, si l'on note a la distance d'une planète au soleil et T sa période orbitale, alors a et T sont liées par une loi mathématique très simple :

$$a \times a \times a = T \times T$$

Attention, il faut utiliser comme unité de a la distance de la Terre au Soleil et comme unité de T une année terrestre. Cela veut dire que pour la Terre $a = 1$ et $T = 1$.

On avait ainsi mesuré toutes les périodes orbitales mais les rayons des orbites des planètes étaient connus non pas en mètres mais seulement par rapport au rayon de l'orbite terrestre. Autrement dit, on pouvait dire que le rayon de l'orbite de Mars valait une fois et demi celui de la Terre, celui de Saturne, neuf fois et demi, etc. Le tableau suivant te donne ces valeurs.

MERCURE	VENUS	TERRE	MARS	JUPITER	SATURNE	URANUS	NEPTUNE
0,39	0,72	1	1,5	5,2	9,5	19,2	30

C'était une étape très importante, car si l'on arrivait à déterminer la distance au Soleil de l'une quelconque des planètes en km, alors on avait toutes les autres.

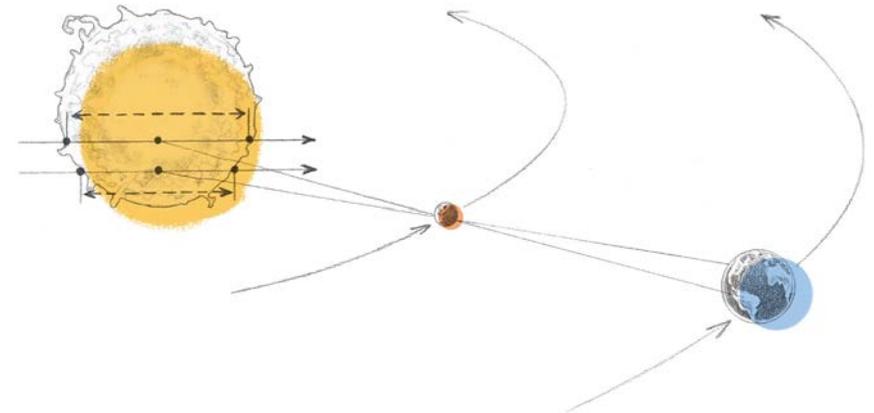
Faire une telle mesure a été possible au 18^{ème} siècle avec une méthode qui ressemble à celle que je t'ai décrite pour mesurer la distance Terre-Lune.

En 1761 quelques astronomes se sont répartis sur les différents continents Europe, Afrique, Asie, pour observer un phénomène très rare : le passage de la planète Vénus devant le Soleil. On appelle ce passage un *transit*. Cela arrive à peu près tous les

LES DEUX PASSAGES LES PLUS RÉCENTS ÉTAIENT EN 2004 ET EN 2012

120 ans avec deux passages séparés de 8 années, puis on doit à nouveau attendre plus d'un siècle. Les deux passages les plus récents étaient en 2004 et en 2012. Beaucoup de personnes, dont les astronomes bien sûr, ont pu les observer.

Au 18^{ème} siècle, donc, des astronomes ont suivi le défilement de Vénus qui apparaissait comme un petit point noir avançant lentement sur le disque du Soleil. Suivant leur position sur Terre, chacun des observateurs a vu un chemin différent suivi par Vénus sur le disque : la ligne semblait passer à différentes hauteurs suivant que l'observateur était plutôt en Europe ou en Afrique, comme le montre la figure ci-dessous.



Ce coup-ci, ils n'ont pas cherché d'étoiles proches comme pour la Lune : si tu réfléchis un peu tu comprendras sûrement pourquoi ce n'était pas possible. Ils ont plutôt regardé l'écartement de deux lignes de transit sur le Soleil, correspondant à deux observateurs. Avant de continuer les explications, je te propose de faire une dernière expérience très facile.

Expérience :

Découpe deux bandes de 1 cm par 28 cm dans du carton solide, comme un intercalaire de grand classeur. Dessine un petit trait à chaque extrémité des bandes dans le sens de la longueur.

Sur chaque bande mets un point à 8 cm d'une extrémité et plante une punaise qui traverse à ce point les deux bandes superposées et qui se pique sur un carton épais, comme sur le dessin ci-dessus.

Maintenant pose un objet comme une gomme ou un petit crayon en travers des extrémités des grands bras et ajuste leur écartement pour que les petits traits soient exactement aux extrémités de l'objet. Maintenant, avec ton double décimètre mesure la distance entre les deux traits des petits bras. Il suffit de multiplier par 2,5 ce que tu auras trouvé pour connaître la longueur de l'objet. Vérifie-le bien en mesurant directement l'objet. Ce nombre de 2,5, c'est juste la division de la longueur d'un grand bras par celle d'un petit bras. Quelle que soit l'écartement des bandes, tu trouveras toujours que la division de la longueur entre les traits des grands bras est 2,5 fois celle entre les traits des petits bras. C'est un grec, Thalès, qui l'a montré il y a bien longtemps.

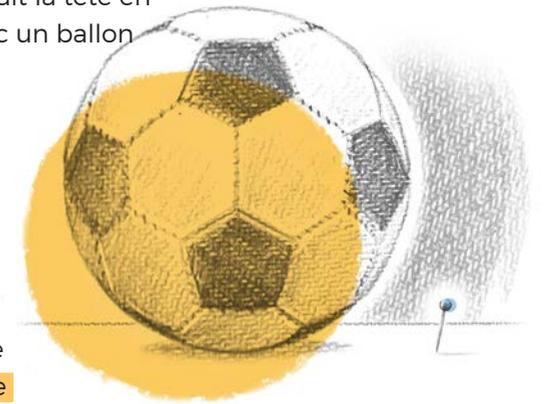


Tu comprends mieux maintenant que l'écartement de deux lignes de transit sur le Soleil est égal à l'écartement des observateurs sur la Terre, multiplié par un nombre qui est la division du rayon de l'orbite de Vénus par **la distance Terre-Vénus**. Or ce rapport on le connaît, si tu regardes la table précédente, il vaut :

$$\frac{0,72}{1 - 0,72} = 2,57$$

On a pu ainsi mesurer au niveau du Soleil la vraie distance en km entre les lignes de transit et donc remonter au diamètre du Soleil, car **ce n'est plus qu'un problème de géométrie**. On s'est alors rendu compte, ce dont on se doutait un peu, que le Soleil était beaucoup plus grand que la Terre : 100 fois plus grand ! C'est comme si l'on comparait la tête en plastique d'une épingle avec un ballon de football.

Du coup, on a pu aussi mesurer la distance entre le Soleil et la Terre et on a trouvé 150 millions de km. C'est une distance qui paraît énorme pour nous les terriens, si tu réalises que **c'est 160 000 fois la distance entre Strasbourg et Brest** ! La lumière, qui voyage pourtant à une vitesse extrêmement grande, met 8 minutes pour nous parvenir du Soleil.

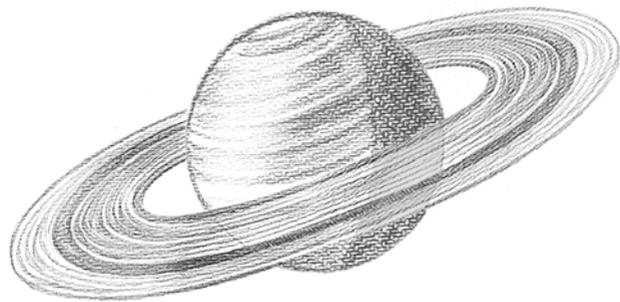


LE SOLEIL EST
100 FOIS PLUS
GRAND QUE
LA TERRE

On s'est aussi rendu compte que le système solaire était gigantesque : Neptune, la planète la plus éloignée, est à 4,5 milliards de km. Une sonde spatiale, même en voyageant à très grande vitesse, met une dizaine d'années pour y arriver.

Pour revenir à l'espace, on se rend ainsi compte qu'il est extraordinairement vide : l'espace occupé par le Soleil et toutes les planètes, dans la grande sphère qui contient tout le système solaire, c'est l'équivalent d'un grain de sable par rapport à ta salle de classe !

Résumé : on a pu en observant le défilement de la planète Venus devant le Soleil, mesurer le diamètre de celui-ci ainsi que toutes les distances des planètes. On a pu comme cela réaliser que le Soleil était gigantesque comparé à la Terre et que le système solaire était immense.



J'espère que toutes ces expériences que tu as réalisées avec tes mains, tout au long de la lecture de ce livre ont bien fonctionné et t'ont donné le goût d'en faire d'autres, y compris à l'école ou au collège avec ton professeur et tes copains.

Je suis confiant, en tout cas, que d'avoir construit et fait marcher ces petits bricolages t'a permis de bien mieux comprendre les explications que j'ai données sur l'espace. Si ce n'était pas le cas, eh bien n'hésite pas à recommencer et pourquoi pas à les améliorer quand tu as constaté un problème.

C'est ainsi que les scientifiques travaillent : ils commencent par réfléchir avec un papier et un crayon, font un croquis de ce qu'ils ont envie d'essayer pour réussir une mesure ou tester une idée, puis ils la réalisent une première fois, on appelle ça un prototype, font un premier essai. Généralement ils se rendent alors compte qu'il y a des problèmes qu'on n'avait pas prévus, ils réfléchissent, changent quelques parties du dispositif, recommencent etc. Jusqu'à être bien sûr de tout maîtriser et bien comprendre.

C'est souvent aussi ce qu'il se passe dans notre vie. Il faut souvent s'obstiner pour réussir.



NOTES

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



NOTES

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

