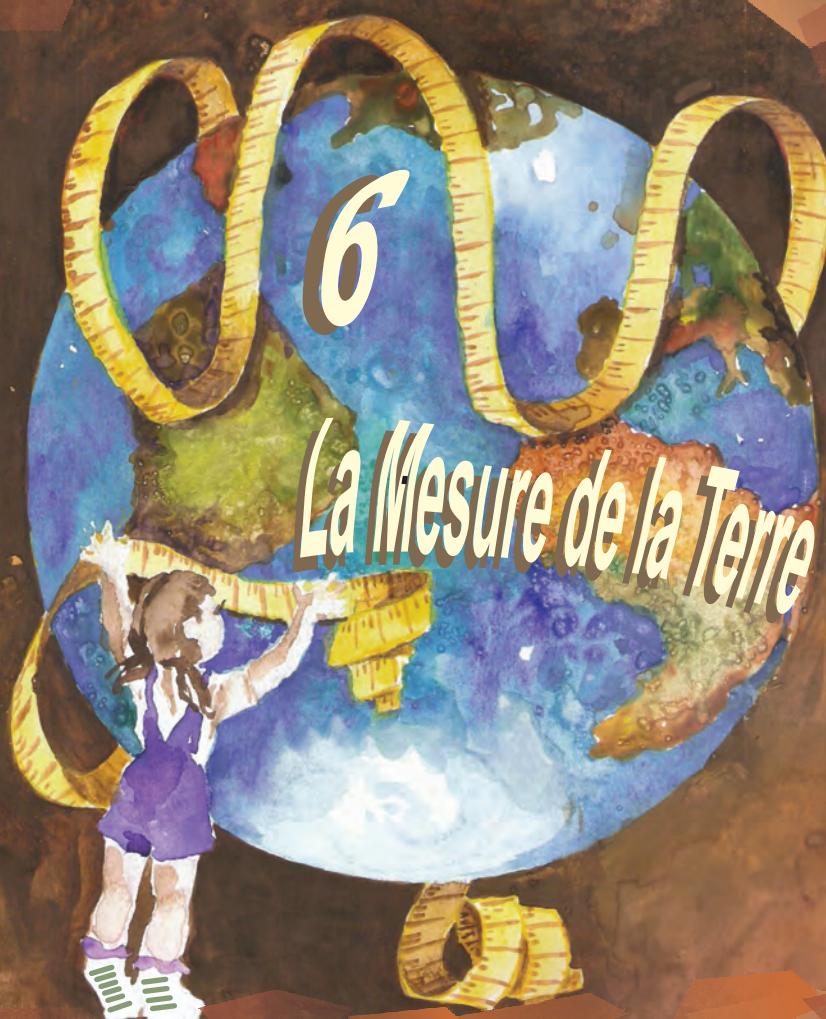


EXPÉRIENCES SIMPLES POUR COMPRENDRE UNE TERRE COMPLIQUÉE



6

La Mesure de la Terre

Texte : Mariano Cerca et Dora Carreón-Freyre

Illustration : Claudia Cuadra

Traducteurs : Thierry Calmus et Sandra Fuentes

Universidad Nacional Autónoma de México

Enrique Luis Graue Wiechers
Recteur

Leonardo Lomelí Vanegas
Secrétaire général

William Henry Lee Alardín
Coordonnateur de la Recherche Scientifique

Jorge Volpi Escalante
Coordonnateur de la Diffusion Culturelle

Socorro Venegas Pérez
Directeur Général des Publications et du Développement Éditorial

Lucía Capra Pedol
Directrice du Centro de Geociencias

Susana A. Alaniz Álvarez
Angel F. Nieto Samaniego
Yadira H. Hernández Pérez
Coordinateurs de la Série

Thierry Calmus
Sandra Fuentes Vilchis
Traducteurs

Claudia Cuadra
Conception et formation

Ma. Teresa Orozco Esquivel
Réviseuse technique

Juan Carlos Mesino Hernández
Éditeur technique

Première édition: août 2020
D.R. © Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México

Centro de Geociencias
Universidad Nacional Autónoma de México
No. 3001, Boulevard Juriquilla, Querétaro
C.P. 76230, México

ISBN (Collection intégrale): 978-607-02-9195-1
ISBN: en cours

Imprimé et fabriqué au Mexique

Ce livre ne peut être reproduit en tout ou en partie, par aucun moyen électronique ou autre, sans autorisation écrite des éditeurs.



EXPÉRIENCES SIMPLES POUR COMPRENDRE UNE TERRE COMPLIQUÉE

6 LA MESURE DE LA TERRE

**Texte : Mariano Cerca et Dora Carreón-Freyre
Illustration : Claudia Cuadra**



INDEX

Introduction
page 1

Les premières mesures
page 4

Expérience 1 : mesure de la circonférence de la Terre
page 8

Expérience 2 : rayons parallèles et divergents
page 11

Expérience 3 : explorer pour faire une carte
page 12

Expérience 4 : mesurer à l'intérieur de la Terre
page 15

Expérience 5 : mesurer des distances avec des ondes
page 16

Expérience 6 : mesurer la teneur en eau du sol
page 20

Expérience 7 : mesurer la consistance du sol
page 22

Expérience 8 : mesurer la consistance des matériaux géologiques
page 25

Remerciements
page 29

À propos des auteurs
page 30

À propos des traducteurs
page 31

Introduction

Depuis son origine, l'humanité a essayé de comprendre quelle était la composition de la Terre, quelle était sa forme et comment elle bouge. La mise au point de systèmes de mesure a été fondamentale pour répondre à ces questions et certaines mesures ont parfois été réalisées de manière ingénieuse et créative. Mesurer consiste à trouver la proportion existant entre un objet et une unité de mesure. Par exemple, nous utilisons une règle pour mesurer des longueurs. Mais parfois, il n'est pas possible d'appliquer directement l'unité de mesure et, dans ce cas, certaines dimensions peuvent être mesurées pour calculer indirectement celles que nous voulons obtenir.

Peux-tu imaginer combien il serait difficile de mesurer la distance entre ta maison et l'école avec une règle ? La distance à la Lune ? Ou la hauteur d'un bâtiment ou d'une montagne ? A ce propos, nous voulons te raconter l'une des expériences les plus ingénieuses qui aient été faites pour mesurer indirectement la circonférence de la Terre. Nous te montrerons également quelques mesures de propriétés intéressantes de notre planète, réalisées dans des disciplines telles que la géographie, la géologie, la géophysique ou la mécanique des sols.

Ératosthène de Cyrène

Ératosthène était un savant grec qui dirigeait la bibliothèque d'Alexandrie au milieu du troisième siècle avant notre ère, soit il y a environ 2250 ans. Outre l'astronomie, il a étudié d'autres disciplines telles que la géographie, la philosophie et la poésie ; et on dit qu'il était très intelligent, raison pour laquelle ses contemporains l'appelaient Beta, β étant la deuxième lettre de l'alphabet grec, car ils pensaient qu'il était le deuxième meilleur dans tout ce qu'il faisait.



Ératosthène est à l'origine de l'invention de la sphère armillaire : un instrument formé d'anneaux métalliques qui tournent à différentes vitesses autour d'un centre commun.

À l'époque d'Ératosthène, on pensait que la Terre était au centre d'un système de sphères dans lequel se trouvaient le Soleil, la Lune, les planètes et les étoiles fixes. La sphère armillaire a permis de calculer avec une bonne précision le mouvement des étoiles, tel qu'on l'observe depuis la Terre.



On attribue aussi à Ératosthène l'invention d'un tamis numérique simple permettant d'obtenir des nombres premiers. Ce dispositif peut être facilement reproduit en classe ou à la maison de la manière suivante : sur le tableau on dessine une grille qui contient les nombres en ordre croissant, en commençant par 2 et en supprimant tous les multiples de chaque nombre. De cette façon, les nombres laissés dans le tableau sont tous des nombres premiers.

	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

« Sur la mesure de la Terre » est le titre de l'ouvrage d'Ératosthène dans lequel est décrite une grande réalisation de l'imagination et de la créativité scientifique qui a jeté les bases des méthodes scientifiques modernes de la géographie. Le contenu de son travail est connu grâce aux citations d'auteurs classiques, car ce qu'il a écrit n'a pas survécu jusqu'à nos jours.

Il est intéressant de mentionner qu'Ératosthène n'était pas le seul homme à se demander quelle était la circonference de la Terre. Une autre expérience utilisant une méthodologie très similaire, bien que moins connue, a été réalisée par Yi Xing il y a environ 1 300 ans, 1 000 ans après la mesure d'Ératosthène ! Ce savant a envoyé 13 appareils de mesure dans différentes villes de Chine pour mesurer l'ombre produite par un bâtonnet de bambou en été et en hiver, et a réussi à calculer avec une grande précision la longueur d'un segment de l'arc méridien.

Actuellement, la mesure directe ou indirecte de nombreuses caractéristiques de la Terre est réalisée par des techniques appartenant à des disciplines telles que la géodésie, la géographie, la géologie et la géophysique.



Dans ce livret, nous commencerons l'expérience 1 en situant le temps dans l'Egypte ancienne et les problèmes rencontrés par Ératosthène pour mesurer les angles solaires et les distances entre les villes. Pour l'expérience de mesure du méridien terrestre, deux obélisques verticaux seront utilisés (que tu pourras découper dans ce livret). Dans l'expérience 2, tu vas mesurer les angles que produisent leurs ombres, suivis de quelques traits géométriques simples.

Nous allons créer une carte et examinerons ses principales caractéristiques dans l'expérience 3. Dans l'expérience 4, nous examinerons comment se sont formées certaines montagnes. Nous allons utiliser la vitesse de propagation d'une onde dans l'expérience 5. Les expériences 6 et 7 ont à voir avec la mesure des propriétés du sol. Dans l'expérience 8, nous verrons comment mesurer la résistance du sol et d'une roche.

Les premières mesures



Lorsque l'expérience d'Ératosthène a été conçue et réalisée, il y a plus de 2 200 ans, il n'existeait aucun instrument précis permettant de connaître les distances entre les villes. Son résultat est donc surprenant. Ératosthène a profité du fait qu'il était responsable de la bibliothèque d'Alexandrie, la plus importante de son époque, pour consulter les cartes du monde connu et les projets de division des terres agricoles en Égypte, et a compris que la surface de la sphère terrestre pouvait être divisée par un réseau de lignes passant par des points connus.

L'expérience d'Ératosthène a consisté à mesurer le méridien de la Terre. Mais qu'est-ce qu'un méridien ? C'est la circonférence de la Terre qui passe par les pôles, tandis qu'un parallèle est un cercle sur la surface de la Terre qui définit un plan perpendiculaire à l'axe de rotation.

L'importance de cette expérience réside dans la manière dont la circonférence de la Terre a été calculée en mesurant les angles avec lesquels les rayons du soleil arrivent, et donc dans la possibilité de l'appliquer pour mesurer des distances entre différents points sur la surface de la Terre et la distance entre la Terre et le Soleil ou la Lune.

La lettre suivante est une fiction mais elle nous permet de réfléchir à certains des problèmes auxquels Ératosthène a été confronté au troisième siècle avant notre ère pour obtenir son estimation de la circonférence de la Terre. Nous savons qu'il a écrit à son ami Ptolémée Évergète sur des sujets d'étude intéressants et qu'il était très curieux de savoir comment les phénomènes terrestres fonctionnent.



Sienne (actuellement Assouan, Égypte), 21 juin

Cher ami Ptolémée Évergète,

Je vous écris de ma chambre à Sienne d'où j'observe les palmiers se mouvant lentement avec le vent, un peu de calme en ces mois de voyages intenses. Les hommes qui composent le petit régiment de soldats que vous avez envoyé pour mesurer constamment la distance entre notre bien-aimée Alexandrie et cette ville ont été d'une grande aide. Nous avons calculé une distance de 5 000 stades* entre les deux villes. J'ai hâte de retourner à Alexandrie et de mesurer avec mon nouveau gnomon** la différence d'angles au prochain solstice. En effet, la différence entre les angles ne peut être expliquée que si la Terre est une sphère et que le Soleil est si loin que ses rayons atteignent une surface parallèle à la surface de la Terre.

Votre ami
Ératosthène

* Un stade égyptien équivaut à environ 160 mètres.

** Un gnomon est un objet allongé généralement de forme triangulaire avec des dimensions précises qui sert à projeter les ombres produites par les rayons du Soleil.

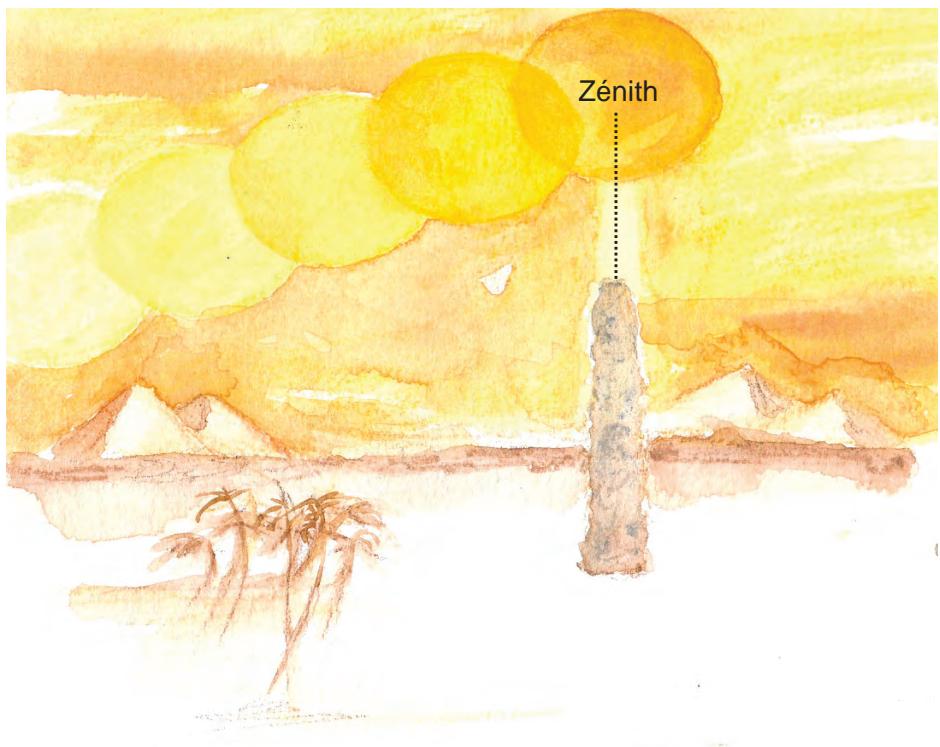


Carte des méridiens et des parallèles au temps d'Ératosthène. Pour calculer la circonference de la Terre, Ératosthène supposait qu'Alexandrie et Assouan se trouvaient sur le même méridien, bien que nous sachions maintenant qu'Alexandrie se trouve à une distance de 3° par rapport à Assouan.

Les Grecs savaient dès l'époque de Parménide, au Ve siècle avant notre ère, que la forme de la Terre ressemblait à une sphère et que le Soleil était si éloigné que ses rayons de lumière y arrivaient parallèles entre eux.

Les Grecs avaient également découvert qu'il y a un angle entre la trajectoire du Soleil et celle de l'Équateur. Tous les jours, à midi pile, il y a un endroit sur Terre où aucune ombre ne se produit car le Soleil passe exactement au zénith.

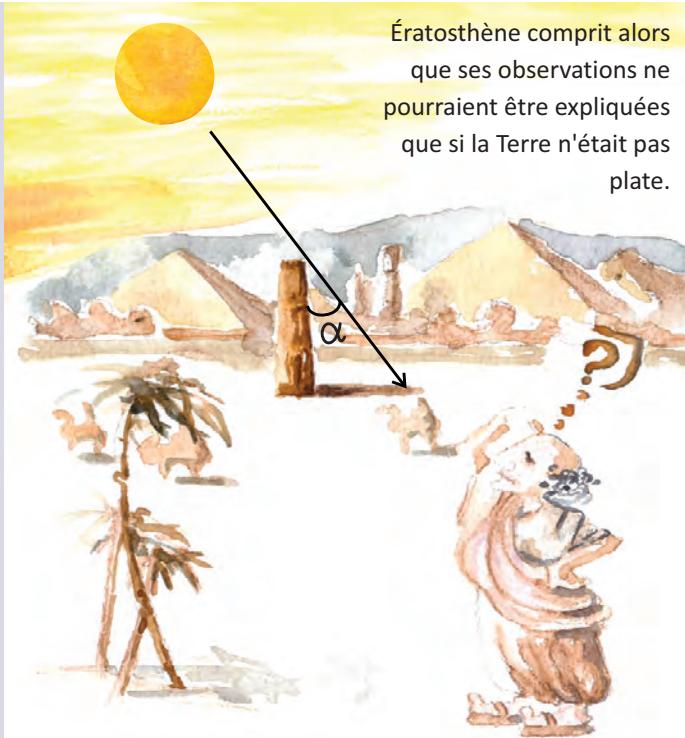
Puisque l'axe de rotation de la Terre est incliné, si tu relies tous les points où il n'y a pas d'ombre à midi, tu pourras définir sur la surface de la Terre un cercle qui montre la trace du déplacement de la Terre par rapport au Soleil appelé écliptique. L'écliptique coupe l'Équateur en deux points deux fois par an. Ces deux instants s'appellent équinoxes. Pendant les équinoxes, le jour et la nuit durent à peu près le même temps (12 heures). Le solstice d'été (21 juin) correspond au jour où le Soleil atteint le point le plus au nord de l'écliptique (sur le tropique du Cancer), tandis que le solstice d'hiver (21 décembre) correspond au jour où le Soleil atteint le point le plus au sud (sur le tropique du Capricorne).



Qu'est-ce que tout cela a à voir avec Ératosthène ? Eh bien, c'est précisément lui qui a calculé que l'angle formé par l'écliptique par rapport à l'Équateur mesure environ 24° . Ératosthène savait qu'Assouan, qui se trouve à la latitude du tropique du Cancer, coïncidait avec l'écliptique au solstice d'été, et nous pouvons maintenant ajouter que pour cette raison, il n'y a pas d'ombre à cet endroit.

De retour à Alexandrie, au midi solaire du solstice d'été, Ératosthène mesura soigneusement l'ombre d'un obélisque de hauteur connue et obtint un angle de $7,2^\circ$.

Ératosthène comprit alors que ses observations ne pourraient être expliquées que si la Terre n'était pas plate.



Ératosthène a utilisé le « stade » égyptien comme unité de mesure de la longueur, ce qui, dans l'Egypte ancienne, correspondait à 160 mètres. Actuellement, nous utilisons des unités de mesure fondamentales définies avec une grande précision. Dans le Système International d'Unités (SI), sept unités physiques fondamentales ont été définies.

Pour nos expériences, nous n'utiliserons que les trois premières unités de mesure du tableau dessin situé à droite; L'angle est une unité complémentaire du SI.

Quantité physique	Unité de mesure	Symbol
Longueur :	mètre	m
Masse :	kilogramme	kg
Temps :	seconde	s
Temperature :	kelvin	k
Quantité de substance :	mole	mol
Intensité lumineuse :	candela	cd
Intensité du courant électrique :	ampère	A

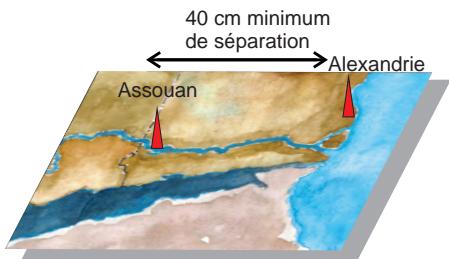
Expérience 1

Mesure de la circonference de la Terre.

Pour expliquer le résultat de la mesure de la Terre, nous reproduirons en miniature l'expérience réalisée par Ératosthène il y a deux mille ans.

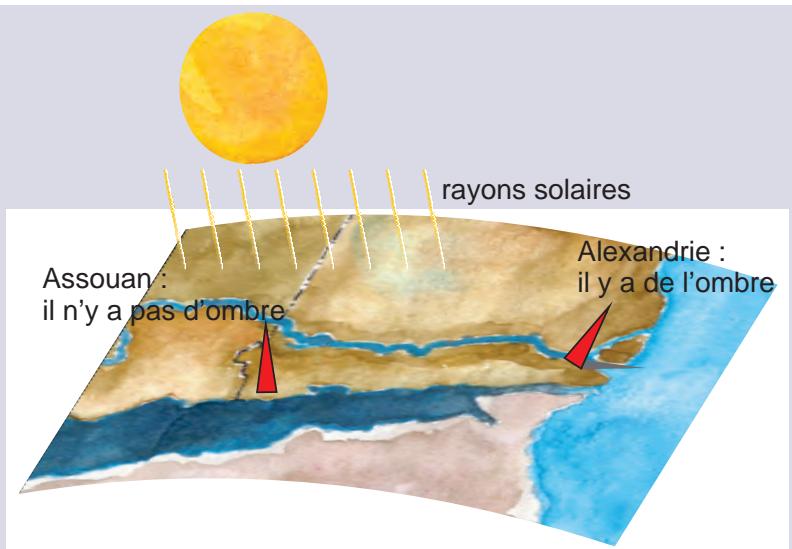
Matériaux

- 2 objets allongés de hauteur connue (tu peux couper et assembler les obélisques disponibles à la fin de ce livret).
- 1 carton ou un gros ballon.
- 1 règle.
- Colle ou ruban adhésif double face.
- Une demi-heure de soleil vers midi.



Indications

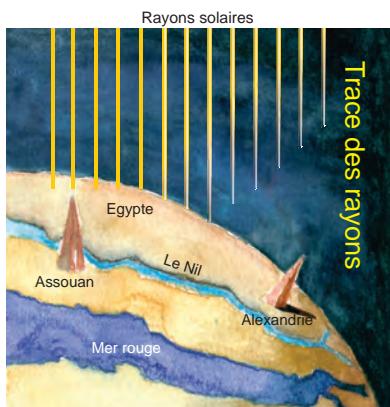
Tu dois d'abord assembler les obélisques et les coller à une distance de 40 cm entre eux sur le carton. Pour plus de réalisme tu peux imprimer ou photocopier une carte de l'Égypte, l'agrandir et placer les obélisques aux emplacements d'Assouan et d'Alexandrie. Assure-toi que les obélisques adhèrent fermement au carton.



Une fois que tu as assemblé ta miniature terrestre, tu peux sortir dans un endroit ensoleillé. Place le carton sur le sol ou bien sur une table et observe les ombres qui se forment. Incline le carton pour que les ombres ne se forment pas sur les obélisques. Tu dois maintenant plier un peu le carton pour simuler la courbure de la Terre et trouver le bon angle de telle manière qu'il n'y ait pas d'ombre à Assouan.

La taille de l'ombre à Alexandrie dépend de la courbure de la Terre. Pour vérifier cette hypothèse, tu peux modifier la courbure du carton afin de produire une ombre plus ou moins grande à Alexandrie toujours sans produire une ombre à Assouan.

L'ombre dépend également de la distance entre les villes. Pour vérifier cette idée, tu peux demander de l'aide à un partenaire ou à un adulte. Tout en conservant une courbure constante, en veillant à ce qu'aucune ombre ne se forme à Assouan, demande à ton assistant de retirer le deuxième obélisque et de le placer plus près ou plus loin.

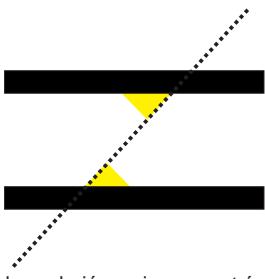


L'ombre dépend également de la distance entre les villes. Pour vérifier cette idée, tu peux demander de l'aide à un partenaire ou à un adulte. Tout en conservant une courbure constante, en veillant à ce qu'aucune ombre ne se forme à Assouan, demande à ton assistant de retirer le deuxième obélisque et de le placer plus près ou plus loin.

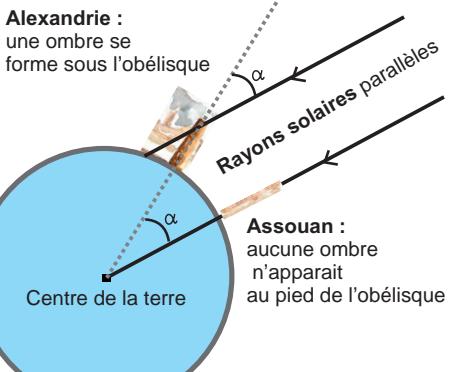
Explication

Le dessin de la page suivante permet d'expliquer le calcul de la circonférence de la Terre. À Assouan, les rayons du Soleil arrivent perpendiculairement à la surface et ne forment donc pas d'ombre. À Alexandrie, la trace des rayons arrive obliquement sur la surface courbe de la Terre.

Si on trace une ligne perpendiculaire à la surface à Alexandrie de manière à intercepter les rayons parallèles, on constate que l'angle de $7,2^\circ$ observé à Alexandrie est égal à la différence de latitude entre les deux villes (voir la carte des méridiens et parallèles). La circonférence de la Terre représente 360° , et comme la distance entre les deux villes est de 5 000 stades, le problème est résolu en divisant simplement 360 par 7,2 et en multipliant le résultat par 5 000. Le résultat est 250 000 stades ou 40 000 km. Pas mal pour l'époque !



Les angles coloriés en jaune sont égaux.



Les angles coloriés en jaune sont égaux.

La circonference de la Terre est de 360°.

L'angle de 7,2° se répète 50 fois dans un cercle.

La distance entre les deux villes équivaut à 5 000 stades.

La longueur de la circonference est $50 \times 5\,000 = 250\,000$ stades. Un stade = 160 m. La circonference de la Terre mesure donc 40 000 km.

Deux défis pour les plus avancés :

Défi 1. Appliquer la méthode d'Ératosthène pour mesurer une balle.

1. Prends une grosse balle (au moins la taille d'un ballon de football) et colle à sa surface les obélisques à une distance donnée.
2. Sors à midi et fais en sorte que l'un des obélisques ne produise pas d'ombre.
3. Mesure la longueur de l'ombre du deuxième obélisque et calcule la circonference de la balle.

Défi 2. Vérifier la méthode d'Ératosthène.

Essaye de reproduire l'expérience d'Ératosthène le jour où le Soleil est au zénith dans ta ville, c'est-à-dire qu'un objet semblable à un gnomon (cadran solaire) ne doit pas générer d'ombre à midi. À Querétaro, où se trouve le Centre de Géosciences de l'UNAM (20,7° de latitude), cela a lieu vers le 25 mai et le 18 juillet. En même temps, il faut mesurer l'ombre d'un objet similaire dans une ville située à peu près sur le même méridien : par exemple, Nuevo Laredo, Tamaulipas, à une latitude de 28,2°, c'est à dire à une distance angulaire similaire à celle entre Alexandrie et Assouan.



Expérience 2

Rayons parallèles et divergents.

Nous savons maintenant que la Terre n'est pas plate et que le Soleil est si loin que ses rayons nous parviennent parallèles entre eux. Les Grecs anciens ont observé la forme circulaire de la planète sous la forme de l'ombre de la Terre sur la Lune lors d'une éclipse, ou lors du changement de hauteur avec la latitude des étoiles fixes, telle que l'étoile polaire. Ératosthène a calculé que la distance entre la Terre et le Soleil était de 140 millions de kilomètres, soit suffisamment pour que les rayons de lumière arrivent parallèlement entre eux. Cependant, pour renforcer ces idées, nous pouvons expérimenter la formation de rayons divergents dans notre expérience en miniature.

Matériaux

1 lampe de poche.

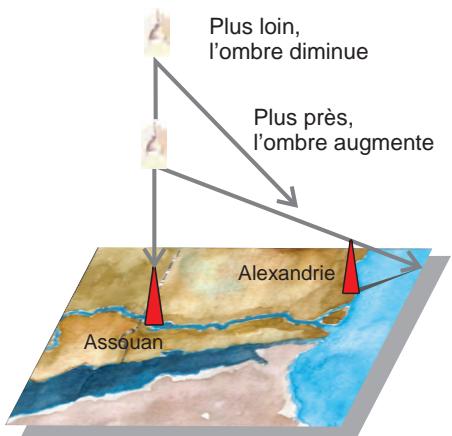
Le carton avec les obélisques que tu as construit dans l'expérience 1.



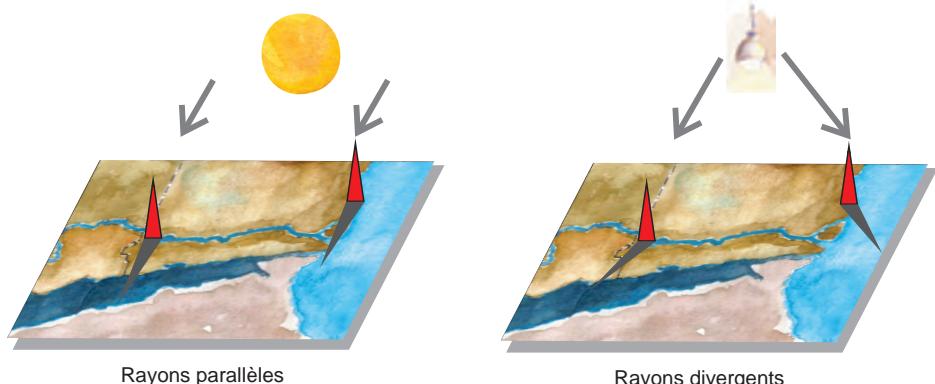
Indications

Place la lampe de poche juste au-dessus de l'obélisque d'Assouan, de sorte qu'il n'y ait pas d'ombre ; observe et mesure la taille de l'ombre à Alexandrie, comme indiqué sur la figure.

Maintenant, rapproche ou éloigne la lampe du carton et observe la taille de l'ombre augmenter ou diminuer. Peux-tu déplacer la lampe assez loin pour faire disparaître les ombres ?



Maintenant, tu peux sortir à nouveau dans un endroit ensoleillé et observer les orientations des ombres lorsque tu poses le carton comme sur la figure suivante. Essaye de reproduire l'expérience avec la lampe de poche. Approche ou éloigne la lampe du carton et observe attentivement ce qui se passe. Cette expérience nous aide à confirmer que le Soleil est très loin de la Terre et que ses rayons nous parviennent parallèlement.



Expérience 3

Explorer pour faire une carte.

Ératosthène est connu comme le père de la géographie, car c'est précisément lui qui lui a donné une méthodologie formelle. L'une de ses grandes réalisations fut de créer une carte du monde connu à cette époque-là. Une carte est une représentation à l'échelle de la Terre ou d'un fragment de celle-ci, qui permet de dessiner des caractéristiques et des symboles qui existent à sa surface. L'une de ses caractéristiques les plus importantes est que les distances et les angles peuvent être mesurés avec une précision correcte. Dans cette expérience, nous allons faire une carte et connaître certaines de ses caractéristiques.

Matériaux

- 1 ruban à mesurer.
- 1 tranche de bouchon et 1 aiguille.
- 1 verre rempli d'eau jusqu'au bord.
- 1 aimant et du ruban adhésif.
- 1 papier graphique (20x20 cm).
- Crayons de couleur.

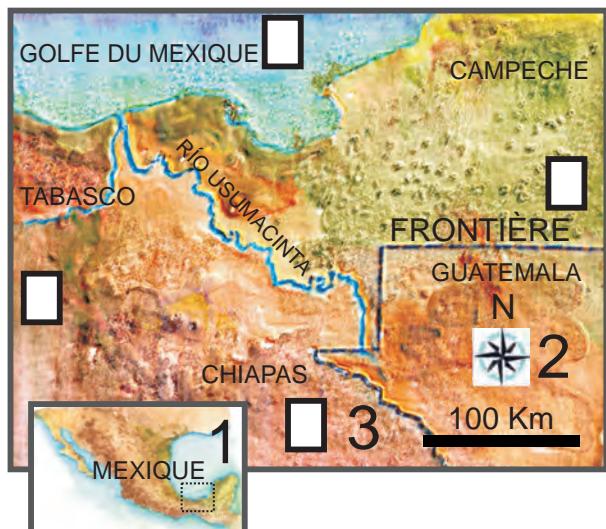
Indications

La carte suivante contient une partie du territoire du Mexique où l'on voit :

- 1) l'emplacement de la carte ; 2) une rose des vents indiquant la direction des quatre points cardinaux ; 3) l'échelle de la carte.

Écris les quatre points cardinaux Nord (N), Sud (S), Est (E) et Ouest (O) dans les cases vides de la carte.

Examine les éléments géographiques de la carte (rivières et frontières) et mesure leur angle par rapport au nord.



Tu vas maintenant construire la carte du parc le plus proche de chez toi. Trace un carré de 20x 20 cm sur le papier et divise-le en lignes horizontales et verticales tous les 2 cm. L'échelle de la carte indique que 2 cm dans ton cahier représentent 1 mètre dans le parc. Choisis un espace ouvert dont les dimensions soient au moins égales à 10x10 m. Une fois dans le parc, il est nécessaire de choisir un point qui représente la position d'origine dans ta grille, le point (0,0).

Pour orienter un côté de la grille par rapport au nord, tu as besoin d'une boussole. Si tu n'en as pas, tu peux facilement la construire en frottant une aiguille sur un aimant plusieurs fois, mais toujours dans le même sens. Place alors l'aiguille sur le bouchon et colle-la avec du ruban adhésif. Place le bouchon dans le grand verre d'eau. Attends que l'aiguille ait fini de tourner et son pôle magnétisé sera dirigé vers le nord. Trace une ligne dans le parc en fonction de l'orientation de l'aiguille.

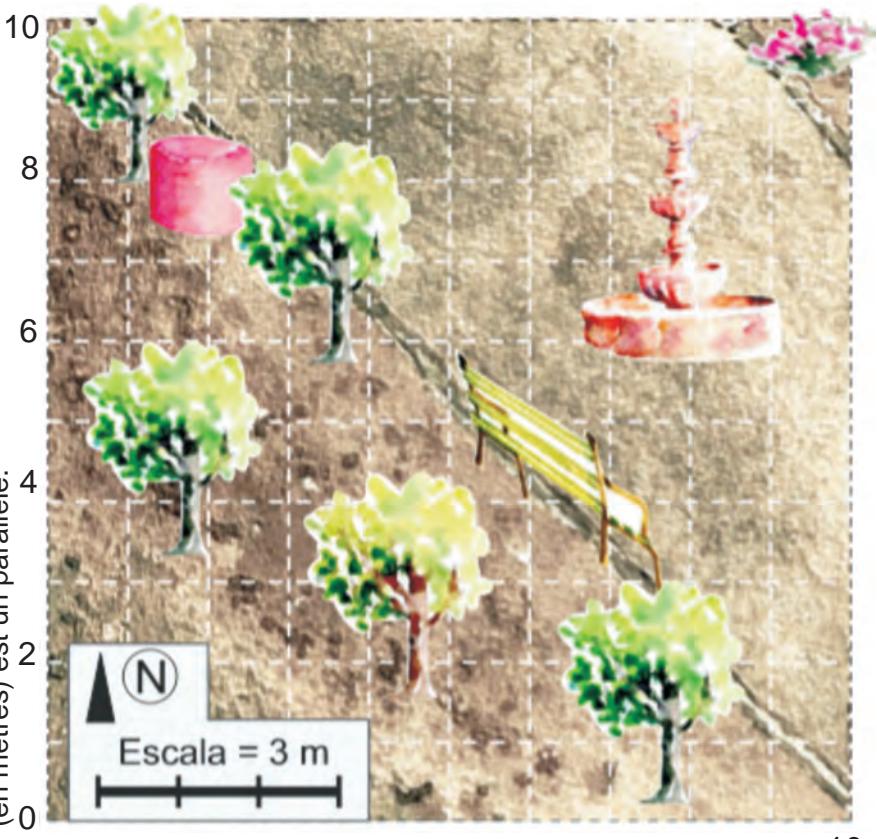


Pour faciliter la localisation des objets sur la carte, tu peux mesurer un pas d'un demi-mètre. À partir du point de départ, mesure 10 m (ou 20 pas) vers le nord. Mets des marques à chaque mètre sur le sol. Reviens à l'origine et tiens-toi face au Nord, lève le bras droit et mesure 10 m dans cette direction, qui sera perpendiculaire au Nord : cette direction s'appelle Est. Localise les objets situés dans la zone de la carte, attribue-leur un symbole. Trace l'orientation du Nord et l'échelle de la carte, qui dans ce cas est de 2 cm = 1 m.



Ça y est, tu as créé ta propre carte ! Tu peux jouer avec tes amis en leur donnant les coordonnées des objets sur ta carte et en leur demandant de les trouver.

Chacune des divisions parallèles à la direction est-ouest (en mètres) est un parallèle.



Chacune des divisions parallèles à la direction nord-sud (en mètres) est un méridien.

Expérience 4

Mesurer à l'intérieur de la Terre.

En Géologie, une coupe est une surface verticale imaginaire qui pénètre à l'intérieur de la Terre et qui montre les différentes couches. En général, les coupes sont tirées des cartes, mais dans certains cas les montagnes nous permettent de voir leur structure (leur disposition géométrique interne) car elles ont été érodées ou coupées par des failles. Dans la figure suivante, nous présentons la coupe d'une montagne dans laquelle on observe que sa structure peut être compliquée. Dans cette expérience, nous allons reproduire à l'échelle une montagne et faire des coupes pour connaître la structure qui en résulte.

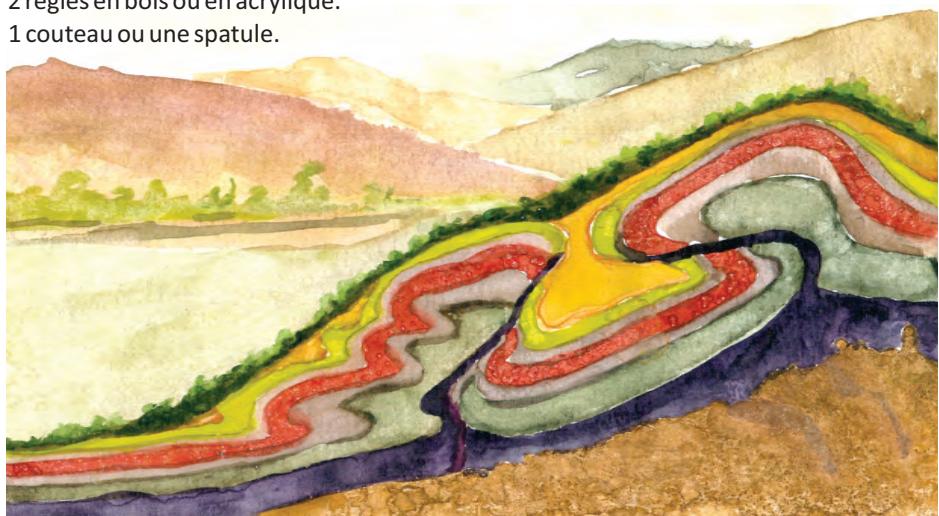
Matériaux

Pâte à modeler de différentes couleurs.

1 rouleau de cuisine.

2 règles en bois ou en acrylique.

1 couteau ou une spatule.



Indications

Sur une surface plate, utilise le rouleau de cuisine pour fabriquer des plaques d'épaisseur différente avec de la pâte à modeler, de préférence de moins d'un centimètre. Par exemple, tu peux en faire deux d'un demi-centimètre et deux autres d'un centimètre. Il n'est pas nécessaire que les épaisseurs soient précises, mais tu peux t'aider avec deux guides sur les côtés ayant l'épaisseur requise. Coupe quatre ou cinq plaques carrées de couleurs différentes mais toutes avec la même dimension de 7x5 cm. Place les plaques les unes sur les autres.

Place les règles aux extrémités du côté long du « gâteau » de pâte à modeler et pousse-les vers le centre pour déformer le gâteau, comme indiqué sur la figure. Avec le cutter ou la spatule, crée des coupes de ton modèle de montagne perpendiculaires aux règles.

Tu peux faire plusieurs petits gâteaux de pâte à modeler et les déformer différemment. Par exemple, tu peux mettre plus de force dans l'une des règles ou la pousser avec un angle. Compare les coupes que tu obtiens.



Expérience 5

Mesurer des distances avec des ondes.

Si tu t'es déjà demandé comment tu peux localiser et connaître la profondeur d'un objet situé sous la surface de la Terre, cette expérience te semblera très intéressante. La géophysique est la discipline qui mesure la structure interne de la Terre et utilise plusieurs méthodes pour localiser des objets dans le sous-sol et déterminer leurs propriétés. Le principe général de ces méthodes est d'envoyer des ondes dans le sous-sol. Tu as sûrement déjà lu le livret 5 « La Terre et ses ondes » dans cette collection. Nous ne t'expliquerons donc que brièvement comment tu peux les observer et à quoi elles servent.

L'un des principes de base de l'étude de la propagation des ondes, c'est que l'énergie, de quelque type que ce soit, peut être réfléchie ou réfractée lorsqu'elle rencontre des milieux aux propriétés différentes. Dans le cas spécifique de la réflexion, si tu souhaites connaître la distance ou la profondeur de l'objet qui reflète l'onde, il te suffit de mesurer le temps qu'il lui faut pour aller et venir et avoir ainsi une idée de la vitesse à laquelle elle se déplace. Rappelle-toi que les ondes se déplacent à des vitesses différentes selon le milieu.

Certaines vitesses du son utiles pour calculer les distances sont les suivantes :
dans l'air = 331 m/s
dans l'eau de mer = 1435 m/s
dans l'eau douce = 1493 m/s
dans le béton = 4000 m/s

Matériaux

Une corde, de préférence de plus de 3 m de long.
Un arbre ou un poteau.



Indications

Pour comprendre le concept de propagation d'une onde mécanique, tu peux effectuer deux expériences simples. 1) Prends la corde, attache une extrémité à un arbre ou à un poteau et prends l'autre extrémité avec ta main. En tenant la corde fermement, bouge le bras de haut en bas et regarder l'onde mécanique provoquée par l'énergie de ton bras se propager à travers la corde.

Explication

L'amplitude est la distance moyenne entre les crêtes et les creux de l'onde et dépend de l'intensité de l'énergie ou de la force avec laquelle tu bouges le bras. La distance entre deux crêtes ou creux consécutifs est appelée longueur d'onde. La fréquence est le nombre de fois où les crêtes traversent le même endroit dans un certain temps ; l'inverse de la fréquence est la période ou le temps qui s'écoule entre le passage de deux crêtes successives. Si tu produis une onde avec une courte distance entre les crêtes, sa fréquence est élevée, mais si tu secoues la corde avec une grande longueur d'onde, tu auras peu de crêtes et de creux le long de la corde et la fréquence sera basse. Si tu mesures avec un chronomètre le temps qu'il faut pour l'onde pour parcourir la distance entre ton bras et le poteau, tu peux connaître sa vitesse de propagation.

Une variante de l'expérience

Comme tu peux le constater, si tu connais l'amplitude, la fréquence et la vitesse des ondes, tu peux connaître certaines caractéristiques du milieu dans lequel les ondes se propagent ou la distance entre deux points . Pour observer la propagation des ondes, il suffit de laisser tomber un petit objet dans un étang, une piscine ou une baignoire remplie d'eau. Lorsque l'objet touche l'eau, tu peux voir que les ondes générées ont une amplitude et une fréquence supérieures à celles des ondes éloignées du point de chute de l'objet. Cela se produit car, à mesure que l'énergie se propage, elle perd de son intensité jusqu'à ce qu'elle disparaisse. Si l'étang est suffisamment grand, tu peux voir que les ondes qui vont plus loin ont une longueur d'onde plus longue, et donc une fréquence plus basse.

Explication

Ces expériences te permettent de connaître un principe de base de la propagation des ondes. Si tu souhaites localiser des objets situés à de grandes profondeurs, tu devras utiliser des fréquences basses, mais si tu souhaites localiser de petits objets à une faible profondeur, tu devras utiliser des fréquences élevées. En géophysique, nous étudions en détail les fréquences qu'il est nécessaire d'appliquer pour les différents types d'énergie, en fonction du milieu étudié ou de l'objet recherché.

Application de l'expérience

Voici une application de ce que tu connais déjà sur la propagation des ondes. Si tu voyageais en bateau et que tu voulais connaître la profondeur de l'eau, tu pourrais utiliser un équipement émettant des ondes acoustiques ou mécaniques, par exemple une cloche, et il te faudrait mesurer le temps qu'il faut pour que les ondes traversent l'eau et reviennent à la surface. Il est nécessaire de disposer d'un équipement spécialisé pour transmettre et recevoir l'onde réfléchie.





Connaissant la vitesse de propagation et sachant que la vitesse est égale à la distance divisée par le temps ($V=d/t$), alors tu peux calculer la distance entre le bateau et le fond du lac ($d=Vt$).



Mesure des propriétés des matériaux de la Terre

Les matériaux géologiques constituent la Terre. D'une manière générale, on peut dire qu'il s'agit des sols, des roches et de l'eau. Dans ce chapitre, nous allons t'expliquer quelles sont les différences importantes entre les propriétés des sols et des roches du point de vue de leur comportement mécanique, c'est-à-dire de leur consistance : combien se déforment-ils ou combien de poids peuvent-ils supporter sans se briser?

Concepts généraux

Le concept de sol peut varier selon les disciplines ou les personnes. Pour toi, le sol peut simplement être le plancher sur lequel tu te tiens en ce moment ; pour un agriculteur, c'est le milieu où poussent et se nourrissent ses cultures ; un géologue définit le sol pour son activité organique et le différencie des sédiments comme le sable, le limon ou l'argile qui peuvent devenir une roche ; pour un ingénieur civil, le sol est le matériau naturel qui se décompose facilement (c'est-à-dire qu'il n'est pas aussi dur que la roche) et dont les propriétés définissent le type de fondation à prévoir pour une maison ou un bâtiment. La discipline qui étudie le comportement mécanique des matériaux géologiques à des fins de construction s'appelle géotechnique, ou plus précisément mécanique des sols pour les sols et les sédiments, tandis que pour les roches elle s'appelle mécanique des roches. De ces disciplines nous avons retenu quelques principes pour te montrer comment mesurer certaines de leurs propriétés.

En accord avec le système unifié de classification des sols, ceux-ci sont classés en fonction de la taille des particules qui les composent en : gravier (entre 4,78 et 2 mm de diamètre) ; sable, comme celui de la plage (entre 2 et 0,075 mm) ; limon, tel que celui que l'on trouve au fond des lacs (entre 0,075 et 0,002 mm) ; et argiles, qui constituent généralement la boue avec laquelle les briques et les pots sont fabriqués (avec des particules plus petites que 0,002 mm ou 2 micromètres). De manière générale, les sols sont constitués d'un mélange de grains de différentes tailles.

Expérience 6

Mesurer la teneur en eau du sol

La plupart des propriétés mécaniques des sols dépendent de la quantité d'eau ou d'humidité qu'ils contiennent. Dans cette expérience, nous allons te montrer comment mesurer la teneur en eau du sol et à quoi cela sert.

Matériaux

Un échantillon de sol. Tu peux prendre n'importe quel matériau naturel d'un jardin, d'une forêt ou des sédiments d'une rivière.

Un verre qui peut être placé dans le four de la cuisine ou au micro-ondes.

Une balance.

Cuisinière à gaz ou four à micro-ondes.



Indications

Pèse le verre vide (poids = Pv) puis remplis-le à ras bords avec l'échantillon de sol et pèse-le à nouveau. Tu obtiens le poids de l'échantillon humide (Pmh) plus le poids du verre vide (Pmh+ Pv). Ensuite, place-le dans le four de la cuisine, pendant 6 heures s'il s'agit d'un four à gaz à 110°C et pendant 5 minutes à pleine puissance s'il s'agit d'un four à micro-ondes.

Ensuite, tu le pèses une fois refroidi : tu obtiens le poids de ton échantillon sec plus le poids du verre vide (Pms+Pv). Si tu soustrais les deux poids (Pmh+Pv-(Pms+Pv)), tu obtiendras le poids de l'eau (Pa) que le sol contenait avant de le sécher au four. Si maintenant tu soustrais le poids du verre au poids total après séchage (Pms-Pv), tu obtiendras le poids du sol sec (Ps). Si tu divises le poids de l'eau par le poids du sol sec et que tu le multiplies par 100, tu obtiendras en pourcentage la teneur en eau ou l'humidité de ton sol (H%) : $H\% = (Pa / Ps) \times 100$.



Expérience 7

Mesurer la consistance du sol

Il est important de mesurer la teneur en eau du sol, car de cette teneur dépend son comportement en tant que solide ou non. Au début du XXe siècle, Albert Atterberg a défini des mesures appelées limites de consistance qui font référence à la quantité d'eau qu'un sol peut contenir sans changer sa consistance ou son comportement physique. Ainsi, le même sol peut se comporter comme un liquide, un plastique ou un solide, en fonction de la quantité d'eau qu'il contient.

Matériaux

Un échantillon de sol.

Un verre.

De l'eau.



Indications

Prends un échantillon de sol, de préférence très sec et sans grumeaux. Pour un meilleur résultat, essaie d'utiliser des mélanges de sable, de limon et d'argile. Remplis le verre avec cet échantillon et retourne-le : tu pourras voir que lorsque le verre est retourné, le sol forme un cône inversé comme tout matériau granulaire sec (par exemple, les cônes de sable inversés qui se forment lors du déchargement des camions-benne).

Maintenant, ajoute un peu d'eau au sol pour former un mélange avec la consistance de la pâte à modeler, remplis le verre avec ce mélange et lorsque tu le retournes tu remarqueras que le sol a pris la forme du verre en tant que moule : c'est sa consistance plastique.



Enfin, ajoute encore plus d'eau au sol jusqu'à ce que tu obtiennes un mélange épais à l'intérieur du verre. Lorsque tu le retournes, tu remarqueras que le sol coule comme tout liquide : on dit alors qu'il a une consistance liquide.

Explication

Avec cette expérience, tu as appris que le même sol peut passer par différents états de consistance : solide, plastique et liquide en fonction de sa teneur en eau. Dans les études sur la mécanique des sols, la teneur en eau des matériaux et leurs limites de consistance sont mesurées afin de déterminer leur comportement pendant et après la construction d'un ouvrage.

Une variante de l'expérience

Une autre propriété importante de certains sols est leur possibilité d'absorber beaucoup d'eau et d'augmenter considérablement leur volume, c'est-à-dire qu'ils se dilatent. On dit qu'ils sont expansifs. Lorsque ces sols sèchent, leur volume diminue et ils se contractent. Les sols qui se dilatent et se contractent sont généralement du limon mêlé à des argiles et sont reconnaissables parce qu'ils sont très plastiques. Les sables ne présentent pas cette propriété. Tu peux savoir si ton sol est expansif avec cette expérience simple.

Matériaux

Un échantillon de sol.

Un verre en plastique transparent.

Un marqueur indélébile.

De l'eau.

Indications

Place un échantillon de terre dans un verre et marque le niveau avec le marqueur, ajoute un peu d'eau et laisse reposer toute la nuit. Si le lendemain l'eau s'est intégrée dans le sol et que son volume a augmenté, tu peux être certain que tu as un sol argileux expansif ; laisse-le sécher et tu pourras voir comment il se contracte.



Application

La figure suivante montre l'importance de ce phénomène. Tu l'as probablement déjà observé comme les petites souris du dessin ci-dessous. En saison sèche, quand il ne pleut pas beaucoup, les sols argileux sont secs et fissurés et le terrain est à un certain niveau.



Lorsqu'il pleut, les sols absorbent beaucoup d'eau et augmentent de volume, comme on peut le voir au niveau de la porte de la maison des petites souris. Lorsqu'il y a des sols argileux dans une zone, il est important de mesurer leur capacité d'expansion et de contraction, car ce phénomène peut causer des dommages importants aux maisons et aux bâtiments. En mécanique des sols, ces matériaux sont appelés argiles expansives.



Expérience 8

Mesurer la résistance des matériaux géologiques

Bien que cela semble évident, il est souvent difficile de faire la distinction entre un sol et une roche. Si le sol est argileux et que la roche est très dure, cela ne fait aucun doute. Le problème commence lorsque le sol est très dur ou que la roche est très altérée et se désagrège au toucher. La définition formelle du mot roche nous dit qu'il s'agit d'un agrégat de minéraux, mais le sol l'est aussi. Une façon de distinguer l'une de l'autre est de voir leur capacité à se déformer ou à se casser lorsqu'une pression leur est appliquée, c'est-à-dire de mesurer leur résistance. Tu peux comprendre ce concept si tu imagines un enfant qui tente de marcher sur un tronc qui ne résiste pas à son poids (voir le dessin ci-dessous). Certains matériaux peuvent sembler résistants, mais ce n'est que jusqu'à ce qu'un effort particulier leur est appliqué que cette propriété pourra être mesurée. Le tronc s'est cassé parce que sa résistance a été vaincue par le poids de l'enfant qui tentait de traverser la rivière.



Lorsqu'une force est appliquée (dans notre exemple, le poids de l'enfant mesuré dans les unités de force kilogramme-kgf du système technique d'unités, ou tout simplement en kilos), sur une unité de surface (ici la surface du tronc sous ses pieds), on obtient une contrainte ou pression dont l'unité de mesure est kgf /S. Si la force est répartie sur une grande surface, la résistance du matériau augmente, mais si elle n'est appliquée que sur une partie ou en un point du matériau, sa résistance diminue. La rupture d'un matériau indique sa résistance sous une certaine contrainte. La différence d'un point de vue mécanique entre le sol et la roche dépend de la résistance qu'ils présentent. Lors d'essais en laboratoire, si le matériau se casse sous une compression inférieure à 14 kgf/cm^2 , il est considéré comme un sol, sinon il est considéré comme une roche.

Matériaux

Trois sachets en plastique de différentes tailles.

Sucre ou sable.

Quatre livres.

Un crayon et un spaghetti.



Indications

Remplis les sachets avec différents poids de sucre ou de sable : 0,5, 1 et 2 kgf. Pour évaluer la différence de résistance entre deux matériaux, nous allons faire l'expérience suivante. Place deux livres empilés devant deux autres sur une table, comme indiqué sur le dessin ci-dessous. Entre les livres, place un spaghetti et au-dessus le sachet de 0,5 kgf. Il se brise car sa résistance est inférieure à la contrainte appliquée. Les sols sont en quelque sorte comme des spaghettis, fragiles et peu résistants. Si tu mets un crayon, tu verras qu'il supporte très bien les sachets de 0,5 ou 1 kgf, mais il se cassera probablement lorsque tu poseras le sachet de 2 kgf. La résistance des roches ressemble plus à celle du crayon, elle est plus grande, mais pas trop.



Una variante de l'expérience

Matériaux

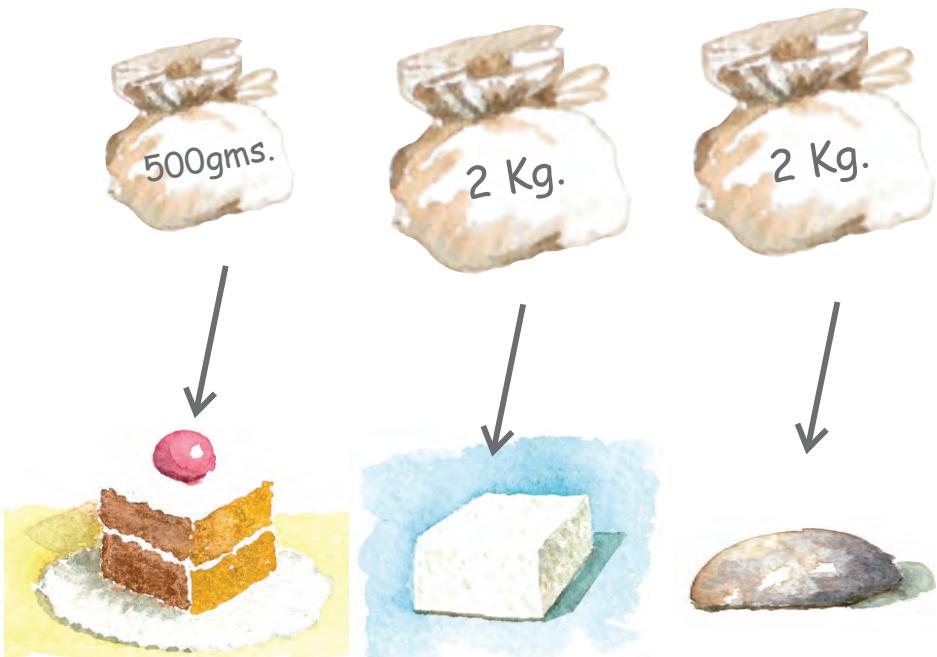
Un morceau de gâteau, un cube de fromage mou et une roche.

Trois sachets en plastique de différentes tailles avec du sucre ou du sable.

Indications

Utilise les mêmes sachets que tu as préparés pour l'expérience précédente. Coupe un morceau de gâteau de 5x5 cm, c'est-à-dire une surface de 25 cm^2 , et place sur lui le sac de 0,5 kgf. Tu verras que le gâteau ne supporte pas le poids car sa résistance à la compression est inférieure à $0,5/25=0,02 \text{ kgf/cm}^2$. Cette résistance est similaire à celle d'un sol argileux, limoneux ou humide. Dans l'expérience précédente, nous avons évalué la différence de résistance à la flexion des matériaux. Nous allons maintenant mesurer leur résistance à la compression.

Si tu fais maintenant la même expérience avec un cube de fromage mou de la même taille, tu remarqueras que rien ne se passe avec le sachet de 0,5 kgf, mais il sera compressé si tu mets dessus le sachet de 2 kgf, car sa résistance à la compression est inférieure à $0,08 \text{ kgf/cm}^2$. Si tu places maintenant le sachet sur une roche de la même taille, tu verras qu'elle supporte 2 kgf sans se déformer, car sa résistance à la compression est beaucoup plus élevée.



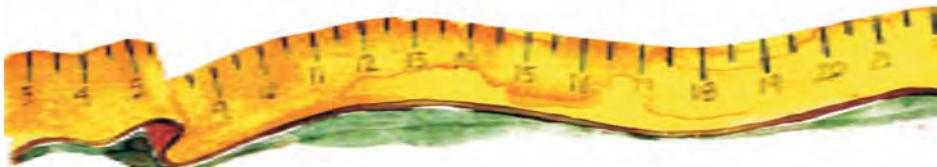


Certains types de roches sont utilisés pour la construction en raison de leur résistance ; par exemple, le tuf est assez tendre pour être modelé, il est donc utilisé comme matériau de construction; le granite résiste à l'usure et est utilisé dans les églises et les musées ; le marbre peut être coupé en plaques et utilisé pour la fabrication de sols. Regarde autour de toi et identifie les types de roches utilisés pour construire les maisons et les bâtiments que tu connais.





L'être humain mesure pour connaître son environnement. De l'expérience d'Ératosthène à nos jours, une infinité de longueurs, de phénomènes et de processus ont été mesurés. Cependant, il reste encore beaucoup de choses à mesurer et à connaître, et des expériences à faire. Nous espérons que ce livret te motivera à les trouver et à les mesurer !



REMERCIEMENTS

Ce livret a été révisé par Rafael Méndez Sánchez, Miguel de Icaza Herrera, Susana A. Alaniz Álvarez, Juan José Martínez Vásquez, Adriana Meyers, Antonino Márquez Sarmiento, Alicia Serrano García, Teresa Soledad Medina, Carolina Muñoz et Ricardo Carrizosa. La correction de style a été effectuée par Héctor Curiel García.



A PROPOS DES AUTEURS

Dora Carreón Freyre

Chercheuse au Centre de Géosciences de l'Université Nationale Autonome du Mexique, elle est titulaire d'un doctorat en Génie Géologique du MINES ParisTech. Elle étudie la fracturation de l'environnement géologique en milieu urbain (instrumentation, surveillance sur le terrain et intégration des bases de données) et développe des travaux expérimentaux en géomécanique au Laboratoire de Mécanique Multiscalaire des Géosystèmes (LAMMG). Elle fait partie du Système National de Chercheurs et du groupe de travail de l'UNESCO sur la subsidence.

Mariano Cerca

Chercheur au Centre de Géosciences de l'Université Nationale Autonome du Mexique, il est responsable du Laboratoire LAMMG, où il effectue des expériences et des mesures sur des matériaux de laboratoire afin d'essayer de comprendre les phénomènes géologiques et mécaniques de la Terre. Il est spécialiste en Géologie Structurale et Tectonique et appartient au Système National de Chercheurs.

Claudia Cuadra

Professeure de peinture à l'Université Ibero Mexicana, elle enseigne également dans des cours particuliers. Elle participe à des ateliers de production artistique. Elle est diplômée de la carrière en Design Industriel et a fait des études de troisième cycle en Arts à l'Académie de San Carlos. Elle a suivi des cours d'aquarelle, de dessin naturel, de peinture à l'huile et d'histoire de l'art à l'Université Autonome de Querétaro.

A PROPOS DES TRADUCTEURS

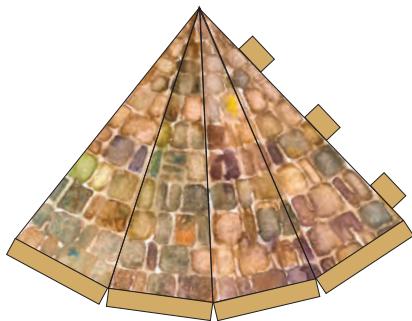
Thierry Calmus

Il a obtenu son Doctorat en Géologie Structurale à l'Université Paris VI en 1983. Il est chercheur titulaire « C » à l'Institut de Géologie de l'Université Nationale Autonome du Mexique (UNAM), membre de l'Académie des Sciences Mexicaine ainsi que du Système National des Chercheurs (SNI). Il a reçu le prix du Professeur de l'Année en 2017 attribué par l'Union Géophysique Mexicaine. Il a publié 60 articles scientifiques, dont un grand nombre sur la géologie et la tectonique du nord-ouest du Mexique. Il a été co-éditeur en chef de la Revista Mexicana de Ciencias Geológicas de 2012 a 2016 ainsi que chef de la Station Régionale du Nord-Ouest de l'Institut de Géologie de 2002 à 2011 et depuis 2018.

Sandra Fuentes Vilchis

Elle a obtenu sa licence en Littérature Française en 1986 et sa maîtrise en Littérature Comparée en 1993 à l'Université Nationale Autonome du Mexique, ainsi que son Diplôme en Traduction à l'Ambassade de France en 1989. Elle est professeure titulaire à l'École Nationale Préparatoire et a été Responsable du Département de Français dans cette Institution. Elle participe à la Commission d'évaluation des professeurs de l'ENP. Elle a participé à plusieurs programmes PAPIME et INFOCAB de l'UNAM.

**Ce numéro bénéficie du soutien
accordé par DGAPA-UNAM aux
projects PE106919, de Mme Susana
Alaniz Álvarez, et Pe400416, de
Mme Yadira Alma Hadassa
Hernández Pérez**



Ce livret a été imprimé grâce a des fonds de la
Coordination de la Recherche Scientifique de la UNAM
et du projet
PAPIME Pe106919



La série «Des expériences simples pour comprendre une planète compliquée» est basée sur la liste des plus belles expériences de l'histoire, publiée par le magazine Physics World en septembre 2002. Elles ont été choisies pour leur simplicité, leur élégance et pour le changement qu'elles ont provoqué dans la pensée scientifique de son époque.

Chaque numéro de cette série est consacré à l'une de ces expériences. Notre objectif est de te faire comprendre, par des expérimentations, des phénomènes qui se produisent à la fois dans notre vie quotidienne et sur notre planète.

Ce numéro est consacré à l'expérience "La Mesure de la Terre" de Ératosthène.

Livrets de cette série :

1. La pression atmosphérique et la chute des corps
2. La lumière et les couleurs
3. EUREKA! Les continents et les oceans flottent !
4. Le temps suspendu à un fil
5. La Terre et ses ondes
- 6. La Mesure de la Terre**

La série complète peut être téléchargée sur le site:

https://tellus.geociencias.unam.mx/index.php/len_guascencia/

<https://sites.google.com/site/recursos4miradas/8>