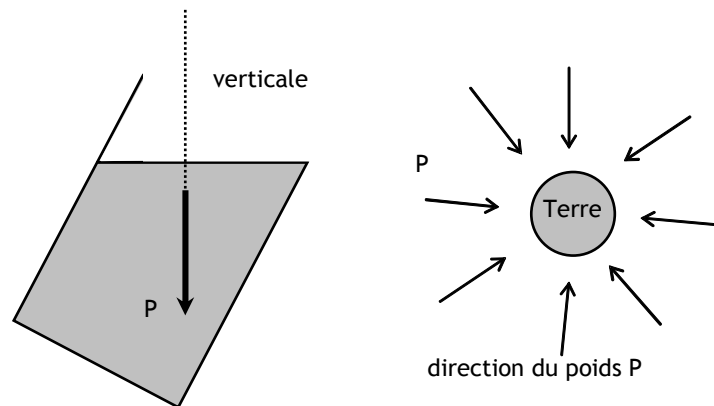


Q.1

Pourquoi la surface d'un verre d'eau au repos est-elle toujours horizontale, même si le verre est incliné ?

Ce phénomène est lié à la force d'attraction qu'exerce la Terre sur l'eau. À tout instant, la surface de l'eau a tendance à former un angle droit avec la direction de cette force. On représente cette dernière par une flèche dirigée vers le centre de la Terre, puisque tout objet ayant une masse est attiré vers ce point.

Verre incliné au repos et direction du champ de gravité



Au repos, la surface de l'eau doit toujours faire un angle droit avec la direction de la force de gravitation (poids P) qui correspond à la notion de verticale (dirigée approximativement vers le centre de la Terre). Si l'on incline un verre, la direction de la force ne changeant pas, la surface libre ne bouge pas non plus.

Question 1

Les choses sont différentes dans le cas où le verre subit une accélération. À titre d'exemple, si l'on place un verre d'eau dans un manège en rotation rapide, la surface de l'eau en contact avec l'air (dite surface libre) s'oriente vers l'axe autour duquel tourne le manège. Ce point sera examiné lors de la question suivante.

» Pour aller plus loin

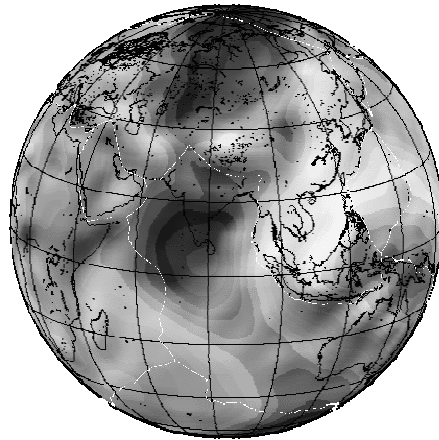
Du fait de sa rotation autour de l'axe Nord-Sud, le globe terrestre est plus aplati aux pôles qu'à l'équateur. La différence est de l'ordre de 20 km. On peut donc considérer que la hauteur d'un point de l'équateur, relativement au centre de la Terre, est supérieure de 20 km à celle d'un point des pôles. Mais dans ce cas comment expliquer que l'eau présente à l'équateur ne s'écoule pas vers les pôles qui sont donc plus bas, puisque l'eau s'écoule toujours du point le plus haut vers le point le plus bas ?

Il faut en fait redéfinir la notion d'altitude. La surface libre de l'eau constitue ce qu'on appelle une équipotentielle. Tout point appartenant à cette surface n'a aucune tendance à aller vers un autre point, car la surface libre forme un angle droit avec la direction de la force de gravitation. Il s'agit d'une situation d'équilibre qui n'a aucune raison d'évoluer. Tout se passe comme si l'eau se trouvait sur un plan parfaitement horizontal. L'ensemble des points de la surface des océans doit être considéré comme appartenant à la même équipotentielle. La situation est donc stable, aucun mouvement n'a donc tendance à s'effectuer dans un sens ou dans un autre.

Du fait des irrégularités du globe terrestre, il n'y a aucune raison que tous les points de la surface équipotentielle soient à la même hauteur par rapport au centre de la Terre. L'équipotentielle qui se confond avec le niveau moyen de la mer est appelée géoïde.

Question 1

Géoïde terrestre



Du fait des irrégularités du champ de gravitation terrestre, le géoïde n'a pas une forme parfaitement lisse. Les nuances de gris décrivent ces irrégularités par rapport au niveau moyen. Schématiquement, on constate la présence d'une bande longitudinale (passant par l'Inde) pour laquelle le champ de gravitation est plus faible que le niveau moyen (zone gris foncé). À l'inverse le champ de gravitation est plus élevé au niveau de l'équateur (zone gris clair). Le continent africain est à gauche.

La force d'attraction évoquée est décrite par la loi de la gravitation universelle. Elle fut énoncée par Newton afin de décrire la force s'exerçant entre deux masses. Il comprit que si un corps tombe sur la Terre, c'est parce qu'il est attiré par elle.

Cette attraction varie comme l'inverse du carré de la distance entre les deux masses. Cela signifie qu'elle est divisée par quatre quand la distance double, par seize quand la distance est quatre fois plus grande, et par cent quand la distance est multipliée par dix. On voit donc que la décroissance est très rapide tout en ayant une portée infinie. La grandeur qui décrit en chaque point l'intensité de l'attraction est appelée champ de gravitation.

Question 1

La force de gravitation devient donc rapidement négligeable pour un astronaute s'éloignant de la Terre. Dans l'espace, la surface d'un liquide n'a par conséquent aucune tendance à être plane comme nous le verrons à la question 15.

L'origine de la gravitation demeure une des grandes énigmes de la physique moderne. La théorie de la relativité générale d'Einstein constitue une tentative d'interprétation de la gravitation en termes de courbure de l'espace-temps (une masse courbe au sens géométrique du terme l'espace qui l'entoure). La question 36 reviendra sur cette approche. Une autre démarche consiste à associer une particule à toute interaction. Cette particule constitue en quelque sorte le messager de cette interaction et permet d'expliquer le fait que cette dernière puisse se propager et ainsi agir à distance. On postule donc l'existence du graviton qui serait le vecteur de propagation de l'interaction gravitationnelle. Cette particule hypothétique aurait une masse nulle correspondant au fait que la portée de l'interaction gravitationnelle est infinie. Aucune expérience à ce jour n'a pu mettre en évidence l'existence du graviton.

Q.2 Pourquoi la surface libre de l'eau se courbe-t-elle lorsqu'un verre tourne rapidement sur lui-même ?

Quand un objet est en rotation autour d'un axe, lorsque l'on fait le bilan des forces à agir sur l'eau, tout se passe comme s'il existait une nouvelle force dirigée de l'axe vers l'extérieur.

Il s'agit de la force centrifuge dont l'intensité dépend de la distance à l'axe et de la vitesse de rotation.

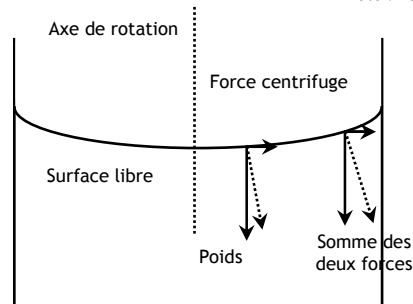
À la force de gravitation qui est constante, on doit donc ajouter une force, dirigée vers l'extérieur, qui dépend de la position de la masse de liquide que l'on considère.

Question 2

Verre d'eau en rotation



Photo : ESPCI.



La surface libre du liquide doit être en chaque point orthogonale à la somme des forces appliquées en ce point.

Plus on s'éloigne de l'axe, plus la force centrifuge augmente. La force de gravitation (poids) étant constante, l'inclinaison de la somme des deux est de plus en plus importante. La surface libre de l'eau devant toujours former un angle droit avec la direction de la force, l'eau remonte donc davantage en allant vers les bords. La forme est dite parabolique.

►► Pour aller plus loin

Il est possible de profiter de la courbure d'un liquide pour réaliser un miroir de télescope. On utilise du mercure qui a l'avantage d'être un métal qui réfléchit bien la lumière et qui est liquide à la température ambiante. Les vapeurs de mercure sont très toxiques. Heureusement, il se forme une pellicule d'oxyde de mercure d'épaisseur 1/10 000 de mm qui évite l'évaporation.

Question 2

Télescope utilisant du mercure en rotation



Photo : Laval University.

La rotation du mercure s'effectue à environ 1 tour toutes les 10 secondes. La vitesse sur les bords est alors de l'ordre de 20 km/h. La forme parabolique ainsi obtenue permet de faire converger les rayons lumineux issus de l'espace (uniquement à la verticale du télescope) en un point unique où seront placés les instruments de mesure.

Le fait que la surface libre de l'eau se courbe sous l'effet de la rotation semble somme toute logique. Mais à propos, par rapport à quoi le verre tourne-t-il ? Ne pourrait-on pas supposer que si l'Univers tournait autour du verre alors la surface libre se courberait également ?

La question peut paraître surprenante, mais est loin d'être sans intérêt. Le problème est donc de savoir si le mouvement de l'eau a un caractère relatif : le fait que l'eau bouge par rapport au reste de l'Univers est-il équivalent au fait que l'Univers bouge par rapport à l'eau ?

Newton affirme que non. Pour lui, il existe un référentiel absolu par rapport auquel l'eau tourne. La difficulté consiste à déterminer ce référentiel absolu par rapport auquel tout mouvement se fait. Le

Question 2

principe d'inertie de Newton affirme que toute masse ne subissant aucune force doit continuer son mouvement en ligne droite à vitesse constante. Cette ligne droite n'existe donc que par rapport à cet hypothétique référentiel absolu.

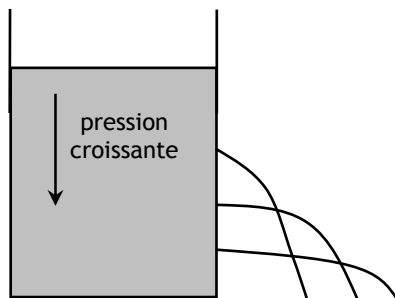
Pour le physicien Mach, tout est relatif et ce référentiel absolu n'a pas de sens. La thèse de Mach n'est pas défendable expérimentalement mais a le mérite de soulever le problème du choix d'un bon référentiel.

Einstein très sensible à l'esprit critique de Mach reformulera de façon magistrale le problème du référentiel dans sa théorie de la relativité restreinte (restreinte car limitée aux référentiels non inertiels) puis dans sa théorie de la relativité générale (générale car applicable à tous les référentiels).

Q.3 Pourquoi un glaçon flotte-t-il dans l'eau ?

Quand un corps est plongé dans un liquide, il subit une force de la part de ce dernier qui tend à l'en expulser. Un objet flotte si son poids est équilibré par cette force que l'on nomme *Poussée d'Archimède*.

L'origine de cette poussée est due au fait que la pression dans un liquide augmente avec la profondeur.



Lorsque l'on remplit un verre d'eau muni de 3 orifices on constate que la portée des jets est différente. Plus la portée du jet est grande, plus la pression est forte. La pression dépend donc de la hauteur du liquide présent au-dessus de l'orifice.

Question 3

En conséquence, un corps plongé dans le liquide subit une force sur sa face inférieure, plus forte que celle exercée sur sa face supérieure.

La résultante de ces deux forces est verticale et dirigée vers le haut du récipient.

L'intensité de la poussée d'Archimède correspond au poids du volume de liquide occupé par l'objet immergé. Elle dépend également de la nature du liquide : un objet placé dans du mercure subira une force 13,6 fois plus importante que dans l'eau. En conséquence, le volume immergé nécessaire sera 13,6 fois moins important que dans le cas de l'eau. Si un homme pouvait marcher dans du mercure, il se maintiendrait hors du mercure en étant immergé seulement jusqu'à mi-mollet !

L'eau étant plus dense que la glace, il n'est pas nécessaire que cette dernière soit entièrement immergée pour que la poussée d'Archimède équilibre le poids. Dans le cas d'un iceberg, on ne voit donc à la surface qu'un dixième du volume total.



La glace occupe un volume d'eau dont le poids est plus grand que le poids correspondant à la quantité immergée de glace. Une partie de la glace n'a donc pas besoin d'être dans l'eau.

Si l'on considère un verre plein contenant un glaçon, quand ce dernier fond, le niveau de l'eau ne bouge pas. En effet, le glaçon occupe dans l'eau un volume égal à son poids. Le volume immergé correspond donc exactement au volume d'eau du glaçon lorsqu'il aura fondu.