

# 3.

## Champ et force de gravitation



© Chonlatee42 Shutterstock.com

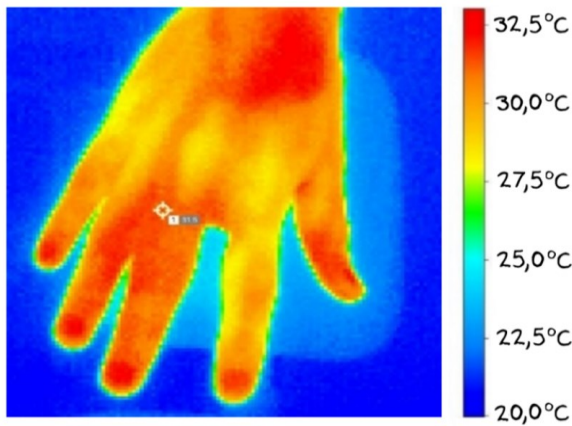
## Sommaire

1	Notion de champ.....	1
2	Force gravitationnelle .....	2
3	Champ de gravitation.....	4
3.1	Définition du vecteur champ de gravitation .....	4
3.2	Caractéristiques pour une masse source à symétrie sphérique .....	4
3.3	Lignes de champ de gravitation .....	5
3.4	Champ de gravitation uniforme .....	6
3.5	Différence entre le champ de gravitation et le champ de pesanteur terrestres .....	6
3.6	Champ de gravitation à l'intérieur d'une planète (facultatif) .....	7
4	Énergie potentielle de gravitation.....	8
4.1	Force conservative et énergie potentielle .....	8
4.2	Définition de l'énergie potentielle de gravitation.....	9
4.3	Surfaces et lignes équipotentiels .....	9
5	Pour en savoir plus .....	11
6	Exercices.....	14

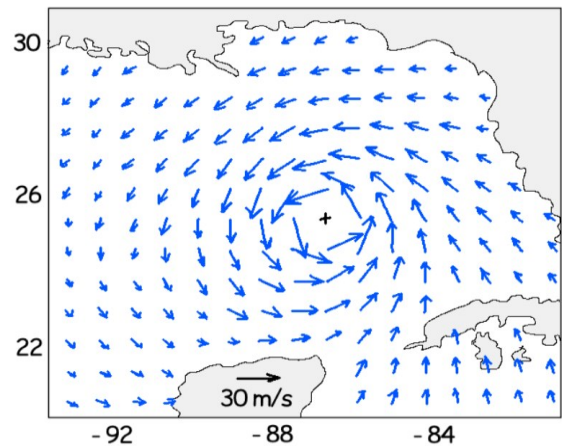
# 1 Notion de champ

Un champ décrit la distribution spatiale d'une grandeur physique. À cet effet, il attribue en tout point de l'espace la grandeur physique en question avec ses caractéristiques locales.

- a. Dans le cas d'un **champ scalaire**, la grandeur physique attribuée possède seulement une valeur.
- b. Dans le cas d'un **champ vectoriel**, la grandeur physique attribuée s'appelle **vecteur champ**. En particulier, si le champ vectoriel détermine en tout point de l'espace le vecteur force qui s'y exerce sur un corps, on parle d'un **champ de force**<sup>1</sup>.



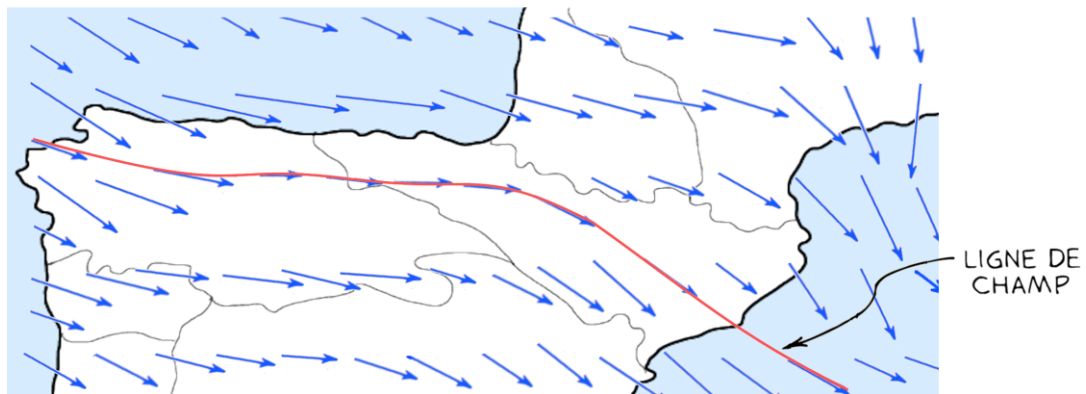
(a) Champ scalaire de température



(b) Champ vectoriel de vitesse du vent

Afin de mieux pouvoir représenter un champ vectoriel, le physicien et chimiste britannique Michael Faraday (1791-1867) a introduit le concept de la ligne de champ.

La **ligne de champ** est une courbe de l'espace à laquelle le vecteur champ est tangent en tout point. Elle est orientée dans le sens du champ.



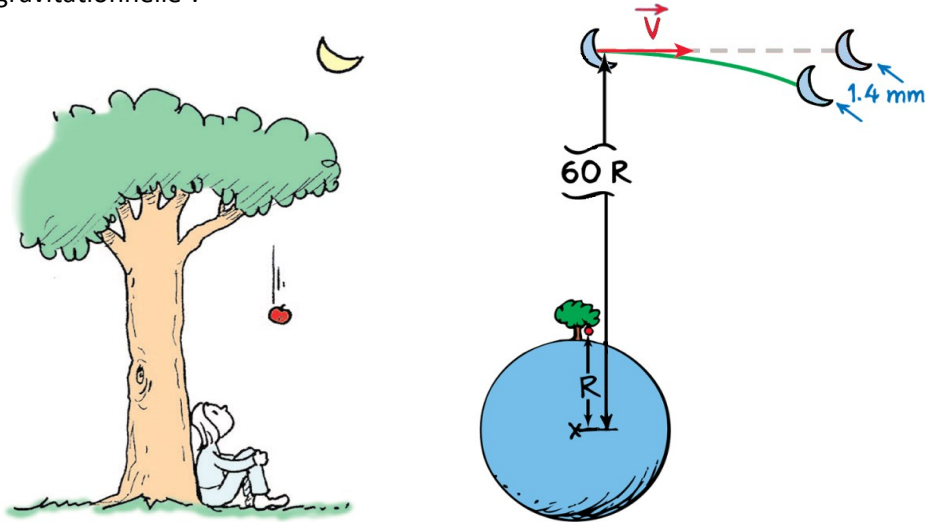
Remarques

- Les lignes de champ ne peuvent jamais se toucher, ni se croiser, ni se subdiviser.
- Plus les lignes de champ sont denses, plus le champ est intense.
- Si le vecteur champ a partout même direction, même sens et même intensité, il s'agit d'un **champ uniforme**. Les lignes de champ d'un champ uniforme sont parallèles et équidistantes.

<sup>1</sup> Parmi les champs de force on compte le champ de gravitation, le champ de pesanteur, le champ électrique et le champ magnétique.

## 2 Force gravitationnelle

D'après la légende, Newton a découvert la gravitation lorsque la fameuse pomme lui tomba sur la tête. Or, ce que Newton a découvert est le fait que l'interaction gravitationnelle a un caractère **universel**, c'est-à-dire qu'elle n'est pas limitée à la Terre mais s'étend à travers tout l'univers. Newton a eu l'intuition que la force qui contraint la Lune sur sa trajectoire approximativement circulaire, et la force qui fait tomber une pomme d'un arbre sont de même nature : dans les deux cas, il s'agit de la force d'attraction gravitationnelle<sup>2</sup>.



*Les chutes de la pomme et de la Lune sont dues à la force de gravitation exercée par la Terre*

Newton réalisa que la Lune tombe en permanence en dessous de la ligne droite qu'elle suivrait en l'absence de force. Une pomme tombe près de 5 m lors de la première seconde de chute. Pour pouvoir expliquer le mouvement de la Lune, Newton doit admettre que l'attraction gravitationnelle diminue avec la distance  $r$  au centre de la Terre d'un facteur  $\frac{1}{r^2}$ . La Lune étant 60 fois plus éloignée du centre de la Terre que la pomme, elle tombe de  $\frac{5\text{m}}{60^2} \cong 1,4 \text{ mm}$  durant la première seconde de chute. Cette valeur est en accord avec la trajectoire de la Lune. Sa grande vitesse tangentielle permet à la Lune de tomber autour de la Terre, plutôt que sur la Terre. Newton a généralisé sa théorie à tous les corps de l'univers. En 1684, il énonce sa **loi de gravitation** :

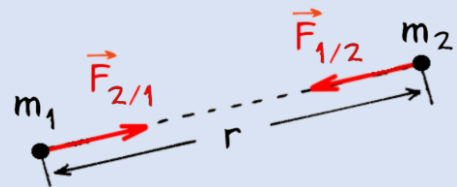
Deux masses ponctuelles  $m_1$  et  $m_2$ , séparées d'une distance  $r$ , s'attirent mutuellement avec des forces  $\vec{F}_{1/2}$  et  $\vec{F}_{2/1}$ , dont les intensités sont

- égales d'après le principe de l'action et de la réaction ;
- proportionnelles au produit des deux masses ;
- inversement proportionnelles au carré de leur distance.

Mathématiquement :

$$F_{1/2} = F_{2/1} = F_g = K \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

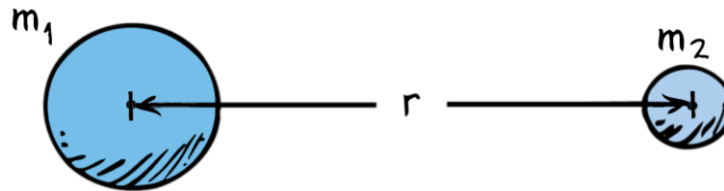
où  $K = 6,673 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$  désigne la constante de proportionnalité (constante universelle).



<sup>2</sup> Newton connaît ses propres lois : Sans force extérieure, tout corps en mouvement effectue un MRU. Si le vecteur vitesse d'un corps change, alors il subit une accélération, donc une force. Le changement de direction que la Lune subit lors de sa trajectoire circulaire autour de la Terre nécessite donc la présence d'une force.

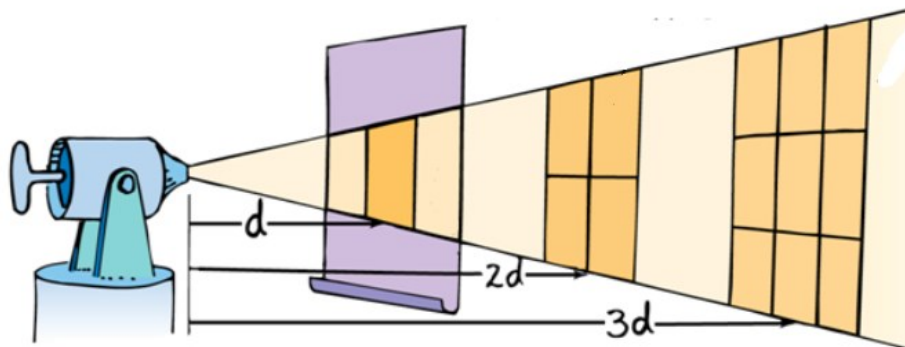
## Remarques

- L'interaction gravitationnelle est toujours attractive et sa portée est infinie.
- Après des années d'efforts, Newton a su prouver que sa loi de gravitation, valable pour des masses ponctuelles, décrit aussi en excellente approximation l'attraction entre les centres de masse des astres.



*Un corps à répartition sphérique de masse est assimilable à son centre d'inertie, affecté de la masse totale du corps.*

- La force gravitationnelle est une **force centrale**, c'est-à-dire qu'elle a une droite d'action qui passe toujours par un point fixe, le **centre de force**. En effet, la force gravitationnelle pointe toujours vers le centre de masse de la masse attirante (= centre de force).
- La **constante universelle K** a été mesurée par Henry Cavendish, environ 150 ans après la formulation de la loi de gravitation. Sa très petite valeur indique que la force gravitationnelle est une force extrêmement faible. C'est la plus faible des quatre forces fondamentales de la nature (les trois autres étant la force électromagnétique et deux types de forces nucléaires). La force de gravitation n'est prédominante que si de très grandes masses sont en jeu.
- La loi de gravitation est une **loi en carré inverse**, loi qui postule qu'une grandeur physique est inversement proportionnelle au carré de la distance de l'origine de cette grandeur physique.



*La force gravitationnelle diminue avec la distance à l'astre de la même manière que l'intensité lumineuse diminue avec la distance à la source de lumière ponctuelle.*

### ■ As-tu-compris ?

1. Considérer un astronaute qui est trois fois plus éloigné du centre de la Terre que lorsqu'il se trouve à sa surface. La force d'attraction gravitationnelle ressentie à cette distance vaut
  - A. zéro
  - B. un tiers de l'attraction à la surface
  - C. un neuvième de l'attraction à la surface

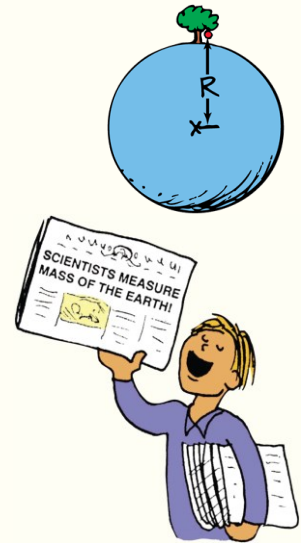
### Exercice résolu

**Énoncé :** Calculer la masse de la Terre à l'aide d'une pomme de 100 g, sachant que le rayon terrestre vaut 6370 km.

**Solution :** La Terre attire la pomme de masse  $m = 0,1$  kg avec une force gravitationnelle d'environ  $F_g = 1$  N (son poids). La distance entre leurs centres de masse vaut  $r = R = 6,370 \cdot 10^6$  m. En utilisant la loi de gravitation de Newton, on peut calculer la masse  $M$  de la Terre :

$$M = \frac{F_g \cdot R^2}{K \cdot m} = \frac{1 \cdot (6,370 \cdot 10^6)^2}{6,673 \cdot 10^{-11} \cdot 0,1} \cong 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

Une fois la valeur de  $K$  connue, la masse de la Terre a pu être calculée, bien avant que certaines régions de la Terre aient été découvertes !



## 3 Champ de gravitation

### 3.1 Définition du vecteur champ de gravitation

On dit qu'il existe un champ de gravitation en un point de l'espace, si une masse témoin placée en ce point est soumise à une force de gravitation. Même si l'on enlève la masse témoin, le champ de gravitation persiste.

Le **vecteur champ de gravitation**  $\vec{G}$  en un point de l'espace correspond à la force gravitationnelle qui s'exerce en ce point sur l'unité de masse :

$$\vec{G} = \frac{\vec{F}_g}{m}$$

L'unité SI d'intensité du champ de gravitation est le newton par kilogramme :  $[G] = 1 \text{ N/kg}$

La force gravitationnelle entre deux masses  $m$  et  $M$  peut dès lors s'interpréter de deux manières :

- La masse  $m$  subit la force de gravitation qui est *exercée à distance par l'autre masse  $M$* .
- La masse  $M$ , appelée **masse source**, associe à tout point de l'espace un champ de gravitation. La masse  $m$ , appelée **masse témoin**, « sent » la présence du champ de gravitation et subit la force gravitationnelle qui est *exercée directement par le champ*.

À l'aide de la notion de champ, on sépare la force de gravitation en deux parties : une partie qui est le champ de gravitation produit par une masse source et une partie, la masse témoin, qui subit l'influence du champ de gravitation. La force gravitationnelle que subit la masse témoin s'écrit dès lors :  $\vec{F}_g = m \vec{G}$

### 3.2 Caractéristiques pour une masse source à symétrie sphérique

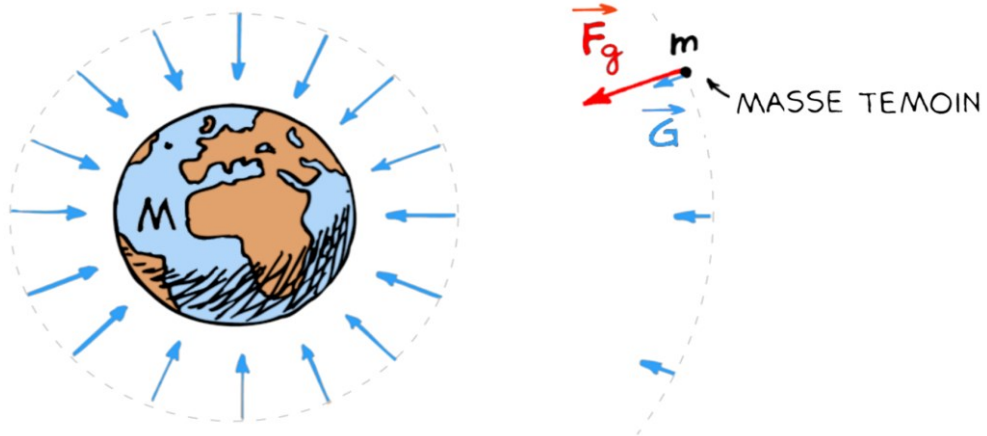
1. **Origine :**  $\vec{G}$  est associé à tout point de l'espace où règne le champ gravitationnel
2. **Direction :** celle de la force gravitationnelle  $\vec{F}_g$  (radiale, passant par le centre de masse de  $M$ )
3. **Sens :** celui de  $\vec{F}_g$  (centripète, vers  $M$ )
4. **Intensité (norme) :**

$$G = \frac{F_g}{m} = \frac{K \frac{m \cdot M}{r^2}}{m} = K \frac{M}{r^2}$$



$G \sim M$  :  $G$  est proportionnel à la masse source

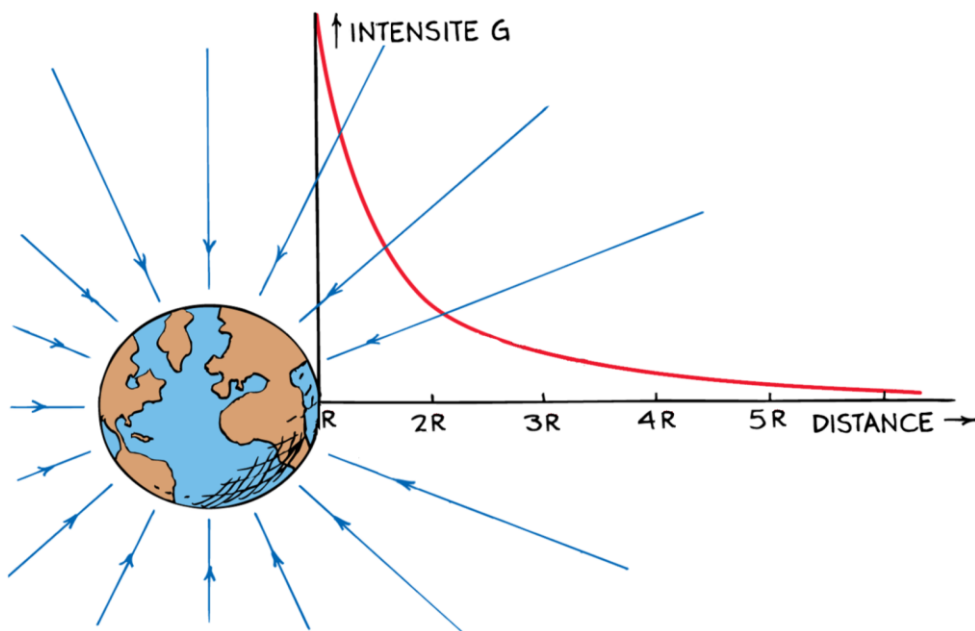
$G \sim \frac{1}{r^2}$  :  $G$  est inversement proportionnel au carré de la distance (loi en carré inverse)



### 3.3 Lignes de champ de gravitation

Le vecteur champ de gravitation est tangent en tout point d'une **ligne de champ de gravitation**. La tangente en un point de la ligne de champ de gravitation indique également la direction de la force de gravitation en ce point.

- Toute ligne de champ de gravitation aboutit à la masse source.
- La densité des lignes de champ est proportionnelle à l'intensité du champ de gravitation.



*L'intensité du champ de gravitation décroît avec la distance au centre de la masse source selon la loi en carré inverse (en rouge). Les lignes de champ représentent le champ de gravitation radial et centripète (en bleu).*

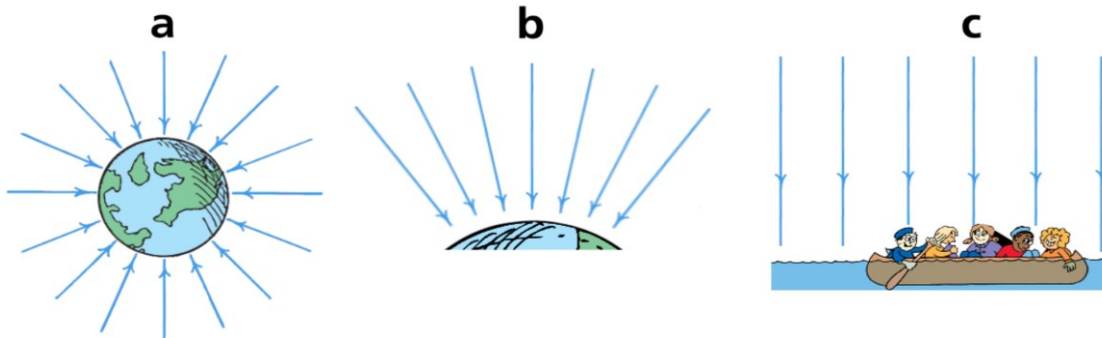
#### ■ As-tu-compris ?

2. Que devient l'intensité du champ de gravitation lorsqu'on double respectivement triple
  - a. la masse témoin  $m$  ?
  - b. la masse source  $M$  ?
  - c. la distance  $r$  à la masse source  $M$  ?

### 3.4 Champ de gravitation uniforme

Un champ de gravitation est uniforme dans une région de l'espace, si, en tout point de cette région, il a même direction, même sens et même intensité :  $\vec{G} = \overrightarrow{\text{const}}$

Les lignes d'un champ gravitation uniforme sont des droites parallèles et équidistantes.



Vue de loin, le champ de gravitation de la Terre est radial (a). Si la région considérée n'est pas trop étendue<sup>3</sup>, le champ de gravitation est uniforme (c).

### 3.5 Différence entre le champ de gravitation et le champ de pesanteur terrestres

L'accélération d'un corps en chute libre est déterminée par le champ de pesanteur  $\vec{g}$ . Elle résulte d'un effet combiné du champ de gravitation  $\vec{G}$  et de la rotation propre de la Terre.

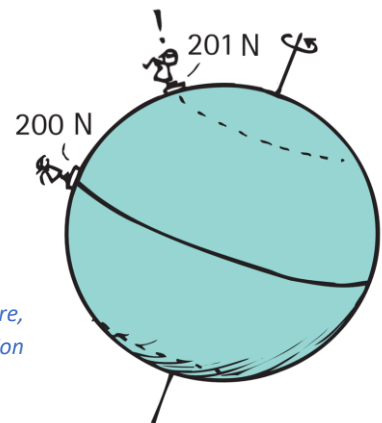
En effet, la rotation de la Terre imprime une accélération centrifuge aux corps qui compense partiellement leur accélération gravitationnelle donnée par  $\vec{G}$ . L'effet centrifuge est maximal à l'équateur et nul sur l'axe de rotation, en particulier aux pôles. Ceci est confirmé par les mesures de l'accélération en chute libre  $g$  au niveau de la mer en différents endroits :

	Équateur	Europe centrale	Pôles
$g$ (en $\text{m/s}^2$ )	9,78	9,81	9,83

Pour l'accélération gravitationnelle à la surface de la Terre on retrouve la valeur de  $g$  aux pôles<sup>4</sup> :

$$G = K \frac{M_T}{R_T^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \cdot 10^{24}}{(6370 \cdot 10^3)^2} = 9,83 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 9,83 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

En tout point hors de l'axe de rotation, le champ de pesanteur  $\vec{g}$  diffère ainsi faiblement (en direction et en intensité) du champ de gravitation  $\vec{G}$ . Il en est de même pour le poids  $\vec{P} = m \vec{g}$  et la force de gravitation  $\vec{F}_g = m \vec{G}$  qu'un corps de masse  $m$  subit. Si la Terre ne tournait pas, ces différences (souvent négligeables) n'existeraient pas.



Due à l'accélération centrifuge causée par la rotation de la Terre, l'accélération gravitationnelle  $\vec{G}$  diffère légèrement de l'accélération de la chute libre  $\vec{g}$ .

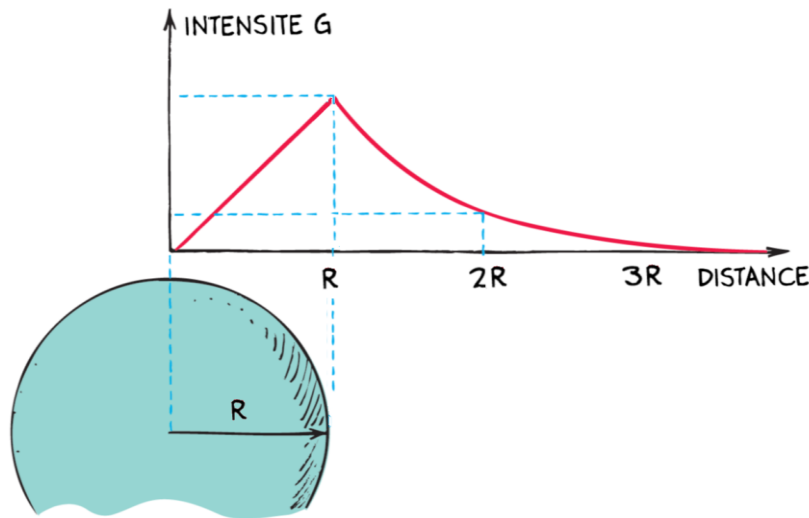
<sup>3</sup> On peut montrer que dans un volume parallélépipédique de base  $100 \text{ km} \cdot 100 \text{ km}$  et de hauteur  $30 \text{ km}$ , le vecteur champ varie de moins de 1 degré en direction et de moins de 1% en intensité.

<sup>4</sup> Pour le calcul on peut négliger que la Terre n'est pas une sphère parfaite (elle est aplatie aux pôles) et que la répartition de sa masse n'est pas parfaitement homogène par couches.



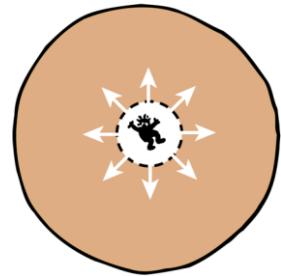
### 3.6 Champ de gravitation à l'intérieur d'une planète (facultatif)

L'attraction gravitationnelle existe aussi à l'intérieur d'une planète. En supposant que la planète soit une boule homogène, l'intensité du champ de gravitation à l'intérieur de la planète diminue linéairement avec la distance au centre de masse de la planète et devient nulle en son centre. Au-delà de la planète, l'intensité du champ de gravitation diminue selon la loi en carré inverse.



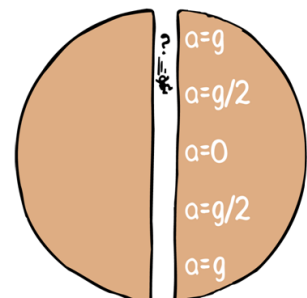
*L'intensité du champ de gravitation à l'intérieur d'une planète de masse volumique uniforme est proportionnelle à la distance radiale de son centre et est maximale à sa surface.*

Imaginons une caverne sphérique au centre d'une planète. Dans cette caverne le champ de gravitation serait nul en raison de l'annulation des forces gravitationnelles dans toutes les directions. On peut montrer que la taille de la caverne ne change rien à ce fait, même si elle constitue la plupart du volume de la planète. Ainsi, une planète creuse n'aurait aucun champ de gravitation à l'intérieur. Une annulation complète des forces de gravitation a lieu partout à l'intérieur de la planète creuse.



Imaginons un tunnel creusé à travers la Terre, par exemple du pôle Nord jusqu'au pôle Sud. Négligeons tous les problèmes pratiques, tels que la haute température au centre de la Terre ou la résistance de l'air, et considérons le mouvement qu'on effectuerait si on sautait dans un tel trou.

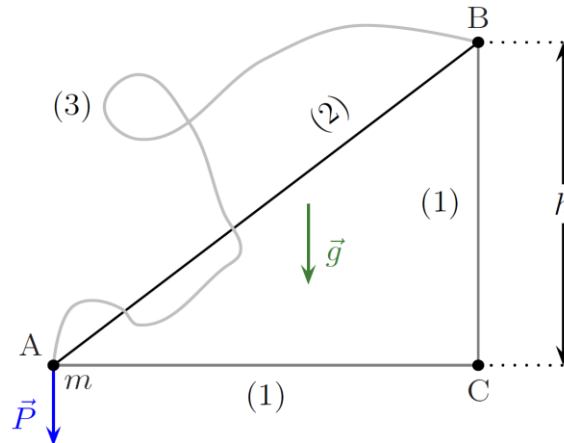
- Au début, l'accélération est égale à  $g \cong G$ . Elle diminue linéairement en s'approchant du centre de masse de la Terre, mais la vitesse de chute augmente tout au long de la descente jusqu'au centre de la Terre.
- Au passage par le centre de la Terre, la force de gravitation subie est nulle. En effet, on y est attiré avec la même force dans toutes les directions. L'accélération est donc nulle à l'instant où on file avec une vitesse maximale vertigineuse de 7,9 km/s par le centre de la Terre.
- Ensuite, on subit une décélération de plus en plus grande en s'éloignant de nouveau du centre. La vitesse diminue progressivement et on atteindrait le bout du tunnel avec une vitesse nulle. Ce trajet durerait 42 minutes. Si on ne s'accroche pas aux bords du tunnel, on effectue un mouvement de va-et-vient (une oscillation) de période 84 minutes.



## 4 Énergie potentielle de gravitation

### 4.1 Force conservative et énergie potentielle

Considérons un corps de masse  $m$  qui est soulevé d'une hauteur  $h$  dans le champ de pesanteur :



On a vu que peu importe si le point d'application du poids suit le chemin (1), (2) ou (3), le travail effectué par le poids entre les points A et B s'écrit :

$$W(\vec{P}) = -mgh$$

où  $g$  désigne l'intensité de la pesanteur. Puisque le travail du poids ne dépend pas du chemin suivi, on dit que le poids est une *force conservative*.

Une **force conservative** est une force dont le travail est indépendant du chemin. Cela signifie en particulier que si le chemin constitue une boucle fermée, le travail effectué sur le corps est nul.

Puisque le travail d'une force conservative ne dépend que des positions initiale et finale, on peut comptabiliser ce travail dans les considérations énergétiques sous forme d'une énergie qui ne dépend que de la position : l'**énergie potentielle**. Dans l'exemple, la variation de l'**énergie potentielle de pesanteur** du système « corps + Terre »<sup>5</sup> s'écrit :

$$\Delta E_p = -W(\vec{P}) = mgh$$

Le signe  $-$  tient compte du fait que pour augmenter l'énergie potentielle ( $\Delta E_p > 0$ ), il faut que le corps soit déplacé vers le haut et donc que le poids effectue un travail résistant  $W(\vec{P}) < 0$ . En convenant que l'énergie potentielle initiale est nulle, on trouve :

$$E_p = mgh$$

De façon similaire, on peut attribuer une énergie potentielle à toute force conservative  $\vec{F}$  selon la prescription :

$$\Delta E_p = -W(\vec{F}) \quad (*)$$

Parmi les forces conservatives, on compte entre autres les forces constantes, la force de gravitation, la tension élastique d'un ressort et la force électrique. Une force non conservative est la force de frottement.

<sup>5</sup> L'énergie potentielle dépend de la position relative des éléments d'un système. Lorsque, comme ici dans le système « corps + Terre », c'est seulement le corps qui se déplace (le mouvement de la Terre étant négligeable), on peut parler de façon simplifiée de l'énergie potentielle de cet élément, en l'occurrence de l'énergie potentielle de pesanteur du corps.

## 4.2 Définition de l'énergie potentielle de gravitation

Puisque la force de gravitation est une force conservative, on peut lui attribuer une énergie potentielle d'après la formule générale (\*) :

$$\Delta E_p = -W(\vec{F}_g)$$

L'énergie potentielle de gravitation d'un système composé d'une masse source et d'une masse témoin est l'énergie qu'il possède du fait de la position de la masse témoin dans le champ de gravitation de la masse source.

Lorsque le champ de gravitation est uniforme, l'énergie potentielle se laisse facilement calculer :

$$\Delta E_p = -W(\vec{F}_g) = F_g \cdot h = m G h$$

où  $m$  est la masse d'un corps soulevé d'une hauteur  $h$  dans le champ de gravitation uniforme  $\vec{G}$ .

En convenant que l'énergie potentielle de gravitation est nulle à la surface de la Terre :

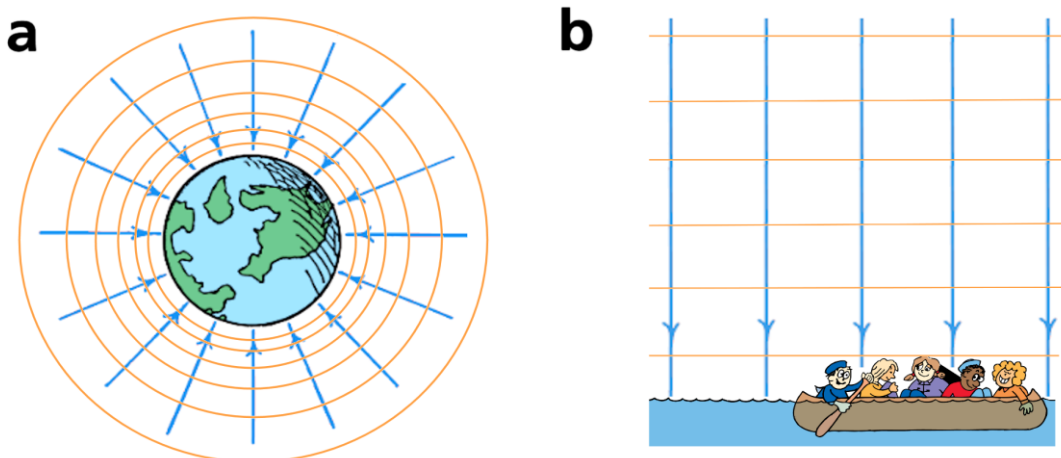
$$E_p = m G h$$

Puisque  $G \simeq g$ , on retrouve l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur.

Lorsque le champ de gravitation n'est plus uniforme, le calcul s'avère plus compliqué. Il sera traité en classe de 1<sup>ère</sup> BC pour le cas particulier du champ radial.

## 4.3 Surfaces et lignes équipotentielle

Lorsqu'on déplace un corps perpendiculairement aux lignes de champ, la force de gravitation n'effectue aucun travail puisque la force est à tout instant perpendiculaire au déplacement. L'énergie potentielle gravitationnelle du corps ne change pas. Pour cette raison, on appelle une surface qui est perpendiculaire aux lignes de champ **surface équipotentielle**. Similairement, une ligne qui est perpendiculaire aux lignes de champ est appelée **ligne équipotentielle**. Sur les figures (p.ex. les figures a et b ci-dessous), l'énergie potentielle d'un corps varie en général de la même valeur entre deux lignes ou surfaces équipotentielles voisines.

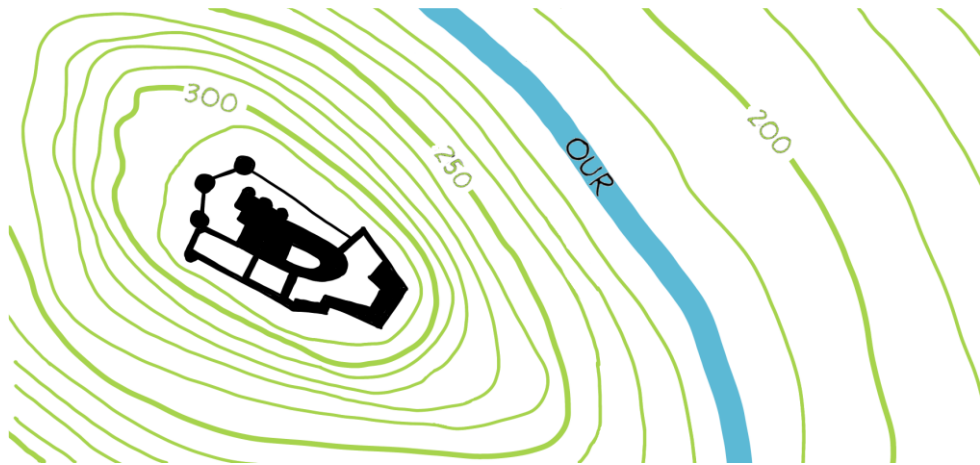


a. Champ radial : Les lignes et surfaces équipotentielles (en orange) sont respectivement des cercles et des sphères concentriques centrés sur le centre de gravité de la Terre.

b. Champ uniforme : Les lignes et surfaces équipotentielles (en orange) sont respectivement des droites et des plans parallèles au sol horizontal.

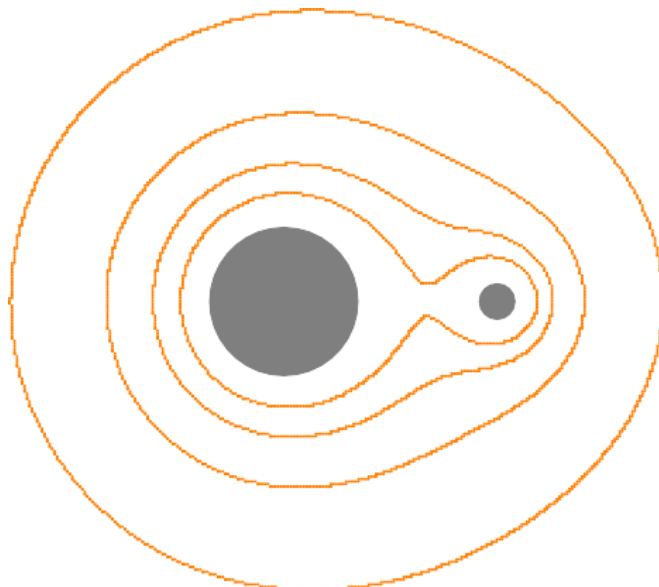
■ **As-tu-compris ?**

3. La carte topographique représente les courbes de niveau aux alentours du château de Vianden.



- Quel est l'écart de l'altitude entre deux courbes de niveaux successives ?
- À quelles altitudes se trouvent le château et la partie de l'Our représentée sur la carte ?
- Comparer le dénivelé à gauche et à droite de l'Our. Justifier.
- Calculer la variation de l'énergie potentielle gravitationnelle d'une personne qui se déplace :
  - le long de la courbe de niveau annotée 300.
  - de l'Our vers le château.
- Les courbes de niveau sur une carte topographique sont-elles analogues aux lignes équipotentiellles ou aux lignes de champ ? Justifier.

4. La figure montre les lignes équipotentiellles autour de deux astres sphériques :



- Expliquer ce que l'on entend par une ligne équipotentielle.
- Rajouter 6 lignes de champ de gravitation sur la figure ci-dessus.
- Les lignes équipotentiellles tendent à devenir circulaires à grande distance des deux astres. Quelle en est la raison ?

## 5 Pour en savoir plus

### Découverte de Neptune et de Pluton

La force résultante qui dicte le mouvement d'une planète n'est pas exclusivement la force de gravitation exercée par le Soleil, mais également celles exercées par les autres planètes. Leur effet est faible par rapport à l'attraction du Soleil, mais néanmoins observable. La déviation de la trajectoire d'une planète causée par l'action d'un centre de force supplémentaire est appelée une *perturbation*. Jusqu'au milieu du 19<sup>e</sup> siècle, les astronomes étaient intrigués par les perturbations de la planète Uranus. En appliquant la loi de la gravitation, deux astronomes – John Adams en Angleterre (1845) et Urbain Leverrier en France (1846) – ont conclu qu'il y avait à avoir un corps céleste au-delà de l'orbite d'Uranus. La planète Neptune a ainsi été prédite avant d'être découverte ! De même, en analysant les perturbations d'Uranus et de Neptune, on a prédit Pluton avant sa découverte en 1930.

### Marées océaniques

Le phénomène des marées est dû à la *différence* de la force de gravitation exercée par la Lune sur les océans de part et d'autre de la Terre. Cette différence de forces crée deux bourrelets d'eau d'environ 1 m au-dessus du niveau moyen des océans.



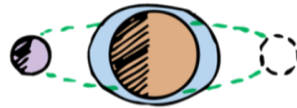
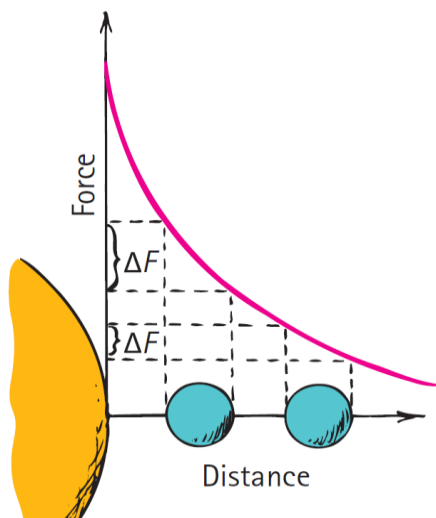
La force de gravitation exercée par la Lune est plus grande sur les océans qui sont face à la Lune parce que la distance à la Lune est plus petite.

Puisque la Terre tourne autour de son axe, un point fixe passe une fois par jour en dessous de ces deux bourrelets d'eau, créant ainsi deux marées hautes et deux marées basses par jour. À cause de l'inclinaison de la Terre, les deux marées hautes d'une journée ne sont pas identiques.

Le Soleil contribue également aux marées. L'attraction gravitationnelle du Soleil sur la Terre est 180 fois plus grande que celle de la Lune. Néanmoins, en raison de la grande distance entre le Soleil et la Terre, la *différence* de la force de gravitation sur les côtés opposés de la Terre est plus petite.

Les vives-eaux sont des marées qui ont une amplitude supérieure à la moyenne. Elles apparaissent lorsque le Soleil, la Terre et la Lune sont sensiblement alignés (pleine lune ou nouvelle lune). Dans ce cas, les effets des marées solaire et lunaire s'additionnent.

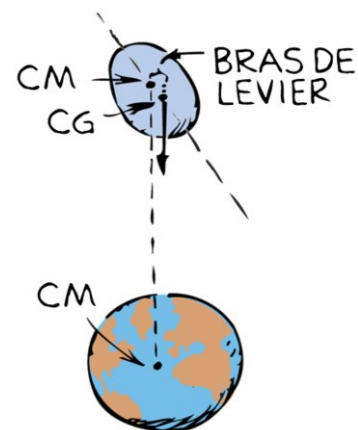
Le phénomène des marées n'est pas limité aux eaux, mais affecte également la croûte terrestre. Il existe même des marées atmosphériques, qui influencent l'intensité du rayonnement cosmique qui atteint la surface de la Terre. Tout comme les marées océaniques, les marées atmosphériques sont les plus prononcées lors d'une pleine lune ou d'une nouvelle lune.



Plus la distance au Soleil est grande, plus la différence des forces de gravitation  $\Delta F$  qui agissent de part et d'autre d'une planète est petite.

### La face de la Lune

La Lune subit aussi le phénomène de marée. Puisque le côté de la Lune face à la Terre est attiré plus fortement que la partie opposée, son centre de gravité est légèrement plus proche de la Terre que son centre de masse autour duquel la Lune tourne. Ceci produit un moment de force lorsque le centre de gravité (CG) de la Lune ne se trouve pas sur la ligne reliant les centres de masse (CM) de la Terre et de la Lune<sup>6</sup>. À cause de ce moment de force, la rotation axiale de la Lune s'est peu à peu synchronisée avec la révolution de la Lune autour de la Terre. La Lune nous présente désormais toujours la même face. Comme la Lune subit toujours l'effet de marée au même endroit, sa forme n'est plus sphérique mais légèrement ovale.



### Sphéricité des astres

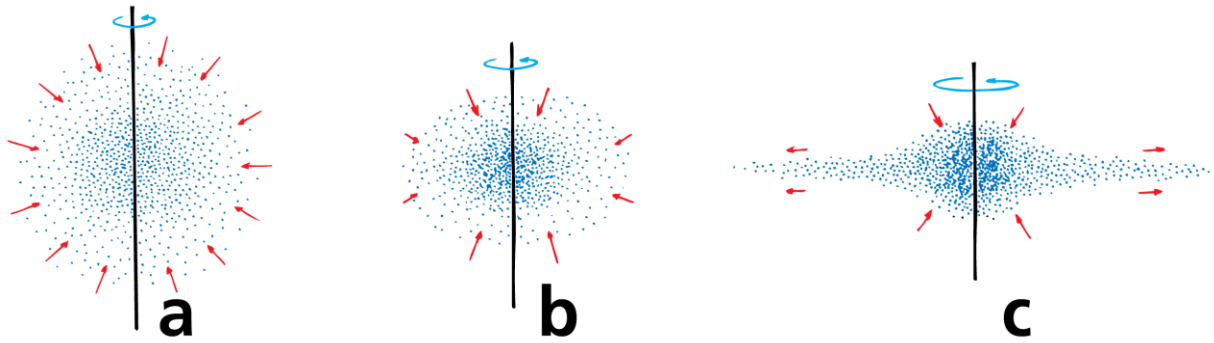
Le Soleil et les planètes ont une forme sphérique car les forces de gravitation exercées par ces corps massifs sur leurs parties extérieures sont assez grandes pour les former en boule. En revanche, dans un astéroïde, une comète ou un caillou les forces de gravitation ne sont pas suffisantes pour vaincre leur résistance à la déformation. Voilà pourquoi ils conservent une forme irrégulière.

### Structure et expansion de l'Univers

L'interaction gravitationnelle est responsable de la structure de l'Univers à grande échelle : formation du système solaire, agglomération des étoiles en amas stellaires, agglomération des amas stellaires en galaxies. Les formes des galaxies lointaines fournissent une preuve supplémentaire que la loi de gravitation s'applique à de plus grandes distances.

<sup>6</sup> Le centre de masse d'un corps est le barycentre de ses points matériels. Le centre de gravité d'un corps est le point par rapport auquel s'annule l'effet de rotation de la force de gravitation. Si le champ de gravitation subi par le corps n'est pas uniforme, le centre de gravité ne coïncide pas avec le centre de masse. Ceci peut être le cas pour des corps célestes. Pour d'autres corps bien plus petits, centre de gravité est synonyme de centre de masse.





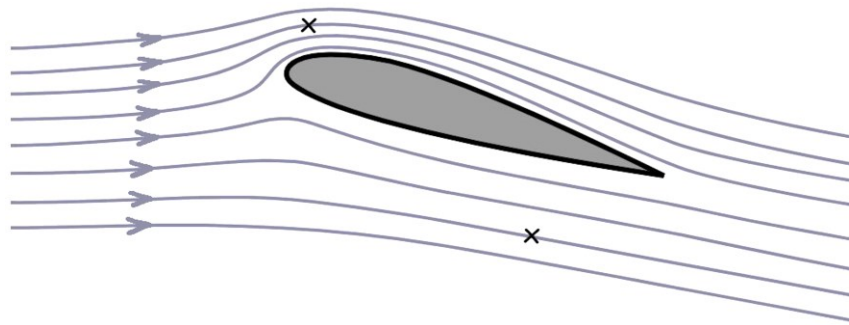
- a. Une boule de gaz interstellaire en légère rotation se contracte à cause de l'attraction gravitationnelle.*
- b. En se contractant, la température et la vitesse de rotation de la boule de gaz augmente. La boule de gaz deviendra le Soleil.*
- c. L'augmentation de la vitesse des amas de matière les amène à balayer sur des orbites plus larges autour de l'axe de rotation, produisant une forme globale de disque. Le refroidissement et les amas de matière en révolution autour du Soleil vont donner naissance aux planètes.*

Selon les théories scientifiques actuelles, l'Univers s'est développé à partir d'une singularité il y a environ 13,7 milliards d'années. C'est la théorie du « Big Bang » de l'origine de l'Univers. Des observations récentes suggèrent que l'Univers est non seulement en expansion, mais que cette expansion s'accélère, comme si l'Univers était poussé par une énergie noire antigravitationnelle, représentant environ 70 % de l'Univers. De plus, les vitesses d'orbite des étoiles dans les galaxies suggèrent qu'il y a plus de force sur les étoiles que juste les masses des étoiles visibles ; il y a aussi l'attraction d'une nouvelle sorte de matière invisible, baptisée matière noire, représentant 25% de l'Univers. La matière ordinaire ne représenterait en effet qu'environ 5% de l'Univers. Les concepts de matière noire et d'énergie noire continueront d'inspirer des recherches passionnantes tout au long de ce siècle.

## 6 Exercices

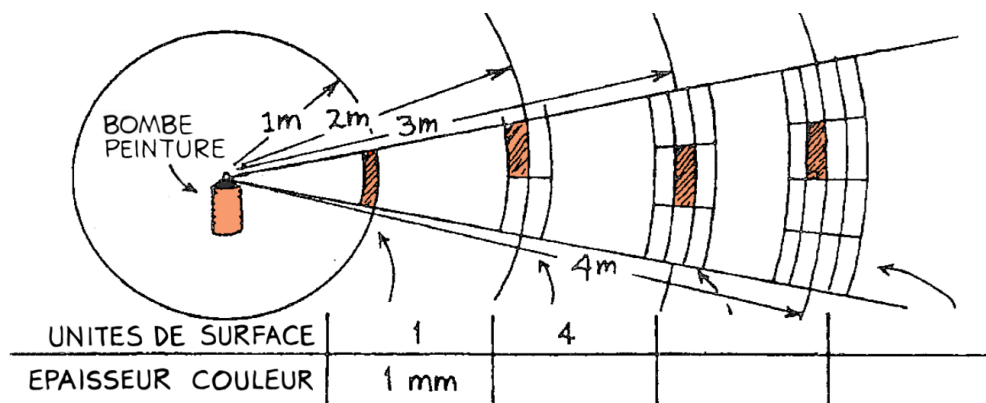
### Notion de champ

- La figure représente les lignes de champ de vitesse de l'air autour de l'aile d'un avion.
  - S'agit-il d'un champ scalaire ou d'un champ vectoriel ? Justifier.
  - La vitesse de l'air est-elle plus grande en dessous ou au-dessus de l'aile ? Justifier.
  - Ajouter le vecteur vitesse aux deux points marqués.



### Force gravitationnelle

- Du spray est émis de manière radiale à partir de l'ouverture de la canette. Remplir le tableau.



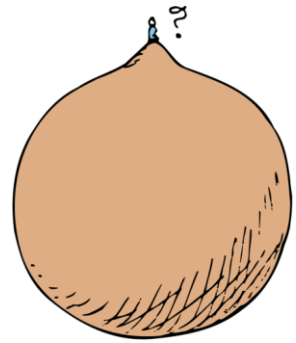
Quel est le lien de cette question avec le champ de gravitation ?

- Calculer la force d'interaction gravitationnelle entre la Terre (T) et le Soleil (S), sachant que  $m_T = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ ,  $m_S = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ , et  $r_{TS} = 1,496 \cdot 10^8 \text{ km}$
- Calculer la force de gravitation entre la Terre et la Lune ( $m_L = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$ ). La distance moyenne entre la Terre et la Lune vaut  $r_{TL} = 384400 \text{ km}$ .
- Qui exerce une plus grande force de gravitation sur un nouveau-né de 3 kg ?
  - Sa maman de masse 80 kg qui se trouve à 0,5 m du bébé.
  - la planète Mars de masse  $m_M = 6,4 \cdot 10^{23} \text{ kg}$  lorsqu'elle est le plus proche de la Terre (distance  $r_{TM} = 5,6 \cdot 10^{10} \text{ m}$ ).
- Montrer que la force de gravitation entre deux corps reste identique lorsque leurs masses et la distance entre leurs centres doublent.
- De combien varie la force de gravitation entre deux planètes lorsque la distance entre leurs centres est réduite d'un facteur 10 ?

8. Pourquoi l'attraction gravitationnelle de la Terre est-elle légèrement plus petite au sommet du mont Everest qu'au niveau de la mer ?

9. Une pomme sur un arbre est attirée avec une force de gravitation de 1 N. Si l'arbre était deux fois plus grand, la force gravitationnelle exercée sur la pomme vaudrait...

- A. la moitié
- B. le double
- C. un quart
- D. Aucune de ces réponses



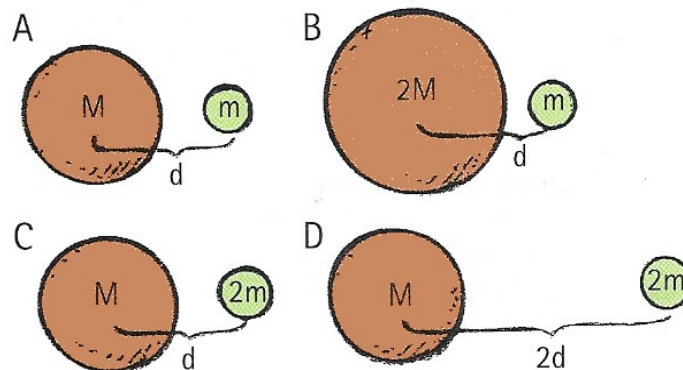
10. Comparée à la force de gravitation exercée par la Terre sur un morceau de fer, la force de gravitation sur un bloc en bois de même masse est...

- A. plus grande
- B. plus petite que
- C. identique

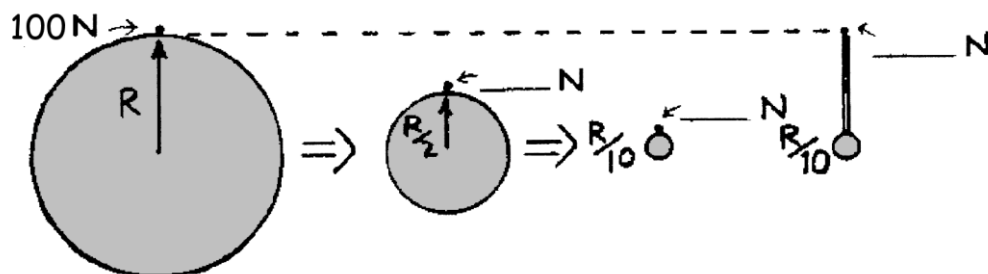
11. Tu atterris sur une planète de même masse que la Terre, mais de diamètre deux fois plus grand. Comment la force de gravitation que tu subis y varie-t-elle par rapport à celle sur Terre ?

12. Tu atterris sur une planète dont la masse et le diamètre sont deux fois plus grands que ceux de la Terre. Comment la force de gravitation y diffère-t-elle ?

13. Ranger par ordre croissant la norme de la force gravitationnelle entre la planète et sa lune.



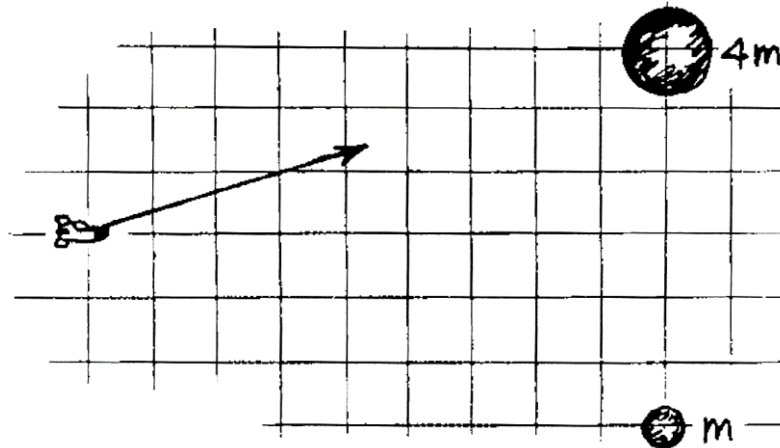
14. Indiquer la force de gravitation subie par le corps qui se trouve sur la surface d'une planète qui s'écroule à masse constante.



15. On considère deux corps ponctuels de masses identiques distants de  $r$ . Si la masse de chaque corps est doublé et que la distance est aussi doublée, alors la nouvelle force gravitationnelle subie par chaque corps vaut

- A.  $F'_g = \frac{1}{8} F_g$
- B.  $F'_g = \frac{1}{4} F_g$
- C.  $F'_g = F_g$
- D.  $F'_g = 4 F_g$
- E.  $F'_g = 8 F_g$

16. Le vaisseau spatial est attiré par la planète et sa lune. La masse de la planète est 4 fois plus grande que celle de la lune, La force de gravitation exercée par la planète sur le vaisseau est illustrée.



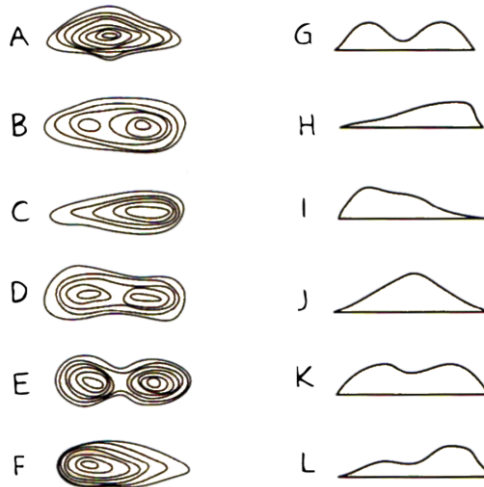
- Représenter la force de gravitation exercée par la lune sur le vaisseau.
- Représenter la force résultante sur le vaisseau spatial.
- Représenter le vaisseau spatial à l'endroit entre la planète et la lune où les deux forces de gravitation s'annulent.

### Champ de gravitation

- Comment peut-on mesurer l'intensité du champ gravitationnel en un endroit ?
- Quelle est l'unité du champ gravitationnel ?
  - N/m
  - N/kg
  - N/s
  - m/s
  - $\text{ms}^2$
- Est-ce qu'un corps se trouvant dans l'espace interstellaire n'est plus soumis à l'attraction gravitationnelle ? Justifier.
- Calculer la masse de la Terre sachant que l'intensité du champ de gravitation à la surface terrestre vaut  $9,83 \text{ N/kg}$ .
- À l'aide de loi de gravitation et de la deuxième loi de Newton, montrer que l'accélération gravitationnelle vers une planète quelconque de masse  $M$  en fonction de la distance  $r$  de son centre de masse est équivalent à l'intensité du champ de gravitation.
- Montrer qu'à l'altitude  $y$  au-dessus de la surface de la Terre, l'intensité du champ de gravitation s'écrit :
 
$$G(y) = G_0 \frac{R^2}{(R + y)^2}$$
 où  $G_0$  désigne l'intensité du champ de gravitation à la surface de la Terre et  $R$  le rayon moyen de la Terre.
- En utilisant la relation ci-dessus, trouver l'altitude à laquelle  $G = \frac{1}{2} G_0$ .
- Calculer l'intensité du champ de gravitation créé par la Lune à la surface de la Lune et au centre de la Terre. Indications :  $R_L = 1\,740 \text{ km}$  ;  $m_L = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$ ,  $r_{TL} = 384\,400 \text{ km}$
- En utilisant les données numériques de l'exercice précédent, trouver le point en lequel le champ de gravitation résultant des deux astres s'annule.

## Énergie potentielle de gravitation

26. Associer les lignes équipotentielles au relief de montagne correspondant.



## Révision

Les affirmations sont-elles vraies ou fausses ?

	Affirmation	Vrai	Faux
1	La force gravitationnelle exercée par la Lune sur la Terre est plus petite que celle exercée par la Terre sur la Lune.		
2	La force gravitationnelle est une force à distance.		
3	L'intensité de la force gravitationnelle entre deux masses ponctuelles quadruple quand la masse de chaque corps est doublée.		
4	L'intensité de la force gravitationnelle entre deux masses ponctuelles reste inchangée quand la masse de chaque corps est doublée et que la distance entre les deux corps double.		
5	La valeur de la constante universelle de gravitation $K$ n'est pas identique sur la Terre et sur la Lune.		
6	L'énergie potentielle de pesanteur d'un corps dépend de la masse du corps.		
7	Le champ gravitationnel est une grandeur vectorielle.		
8	L'intensité du champ gravitationnel terrestre $G$ vaut à une altitude égale au rayon de la Terre $G_0/2$ , où $G_0$ est l'intensité du champ gravitationnel terrestre à une altitude nulle.		
9	Un champ gravitationnel est dit uniforme, si son intensité reste partout constante.		

## Crédits Photos

© Chonlatee42 / Shutterstock.com (1934346833) – p.0 (page titre)

© Gilles Frising – p.3 (champ scalaire de température)

## Crédits Illustrations

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT. Les illustrations sont, sauf indication contraire, l'œuvre de Paul G. Hewitt et des auteurs du cours. Les illustrations de Paul G. HEWITT ont été retravaillées par Laurent HILD, avec l'autorisation écrite et personnelle de l'auteur. Les illustrations originales sont des livres :

© HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson

© HEWITT, Paul G., SUCHOCKI John, *Conceptual physical science – Practice Book*, 2012, Pearson