

## Champs et forces

Au début du XIX<sup>ème</sup> siècle, la communauté scientifique se passionne pour les découvertes expérimentales et les discussions théoriques sur l'électricité et le magnétisme.

En 1820, si les phénomènes magnétiques autour des aimants sont connus depuis l'Antiquité, notamment en Chine, le physicien danois Hans Oersted met en évidence un nouvel effet magnétique créé par le passage du courant électrique dans un simple fil.

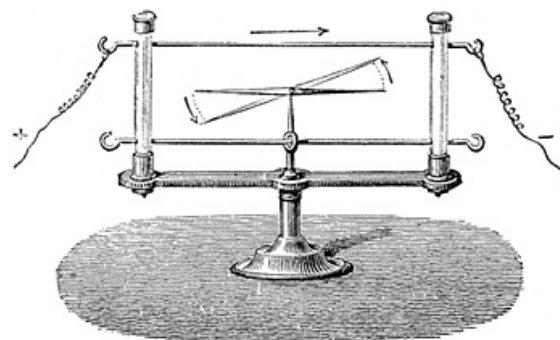
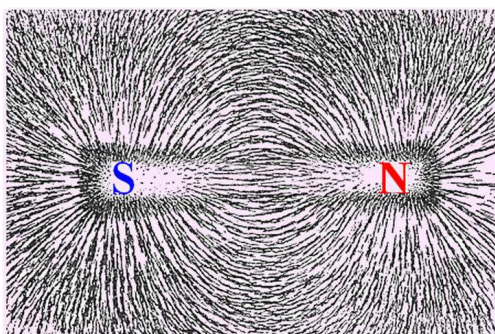
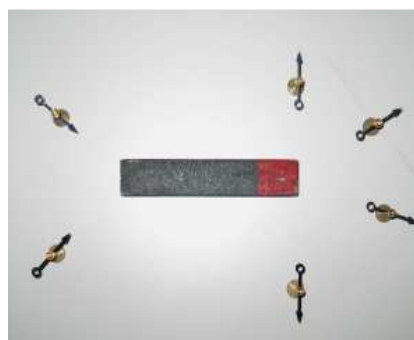


Fig. 60. — Expérience d'Oersted.

Le Britannique Michael Faraday, expérimentateur de génie, réalise de nombreux spectres magnétiques ; ses résultats le conduisent à proposer un nouveau point de vue théorique selon lequel les propriétés de l'espace au voisinage des objets sont modifiées par leur caractère électrique ou magnétique.



Spectre d'un aimant droit



Aiguilles aimantées autour d'un aimant droit

En s'appuyant sur les travaux de Faraday et sur ceux du Français Ampère, James Clerk Maxwell introduit les concepts de champ magnétique et de champ électrique au sein d'une théorie révolutionnaire : l'électromagnétisme.

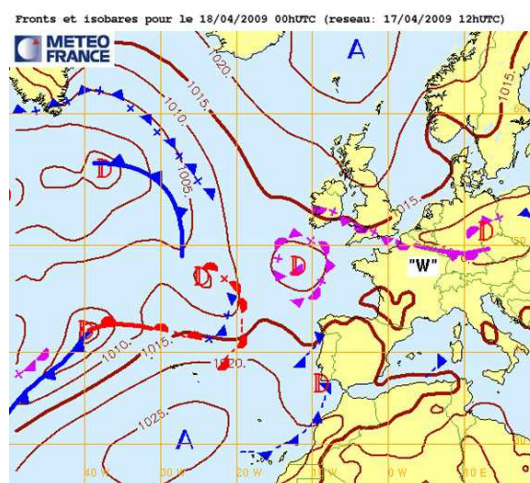
Par la suite, le concept de champ s'est élargi, notamment à la gravitation puis à la relativité, et à la physique quantique, dont il devient une grandeur essentielle.

### 1 – Notion de champ

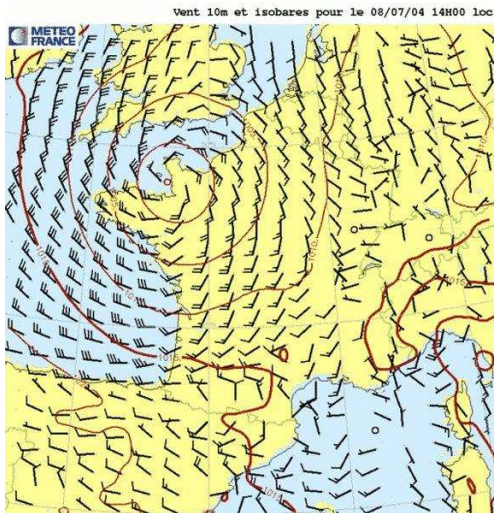
#### 1.1 – Des grandeurs physiques différentes



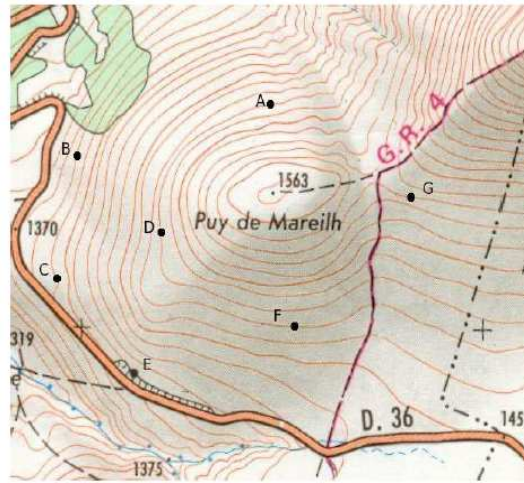
**Document 1** : carte des températures



**Document 2** : carte des pressions



**Document 3** : carte des vents



**Document 4** : carte IGN du massif du Sancy

|                               | Document 1 | Document 2 | Document 3 |
|-------------------------------|------------|------------|------------|
| Grandeur physique représentée |            |            |            |
| Unité                         |            |            |            |
| Appareil de mesure            |            |            |            |
| Scalaire/vectorielle          |            |            |            |

Les **grandeurs scalaires** sont complètement décrites par leur valeur

Pour les **grandeurs vectorielles**, la connaissance de la valeur ne suffit pas : d'autres informations, telles que la direction et le sens, sont nécessaires. La grandeur physique est alors associée à un vecteur.

**Un champ est la représentation d'un ensemble de valeurs prises par une grandeur physique en différents points d'une région de l'espace.**

Comme les grandeurs, les champs peuvent être scalaires ou vectoriels.

### 1.2 – Représentation des champs

1. Comment font les physiciens pour représenter un champ scalaire ?
2. Comment font les physiciens pour représenter un champ vectoriel ?
3. Sur le document 2, des courbes apparaissent : quelle est la particularité des différents points de cette courbe ? Comment la nomme-t-on ?
4. Comment nommerait-on des courbes analogues sur le document 1 ?
5. Pour un champ vectoriel, on représente des lignes de champ, qui sont des courbes tangentes aux vecteurs en tout point de l'espace.
6. Représenter plusieurs lignes de champ sur le document 3.
7. Dans quelles zones peut-on considérer que le champ est uniforme ? Justifier.

Un exemple : sur une carte IGN

On observe sur l'extrait de carte (**document 4**) de l'institut Géographique National (IGN), des courbes qui donnent une idée du relief (Massif du Sancy).

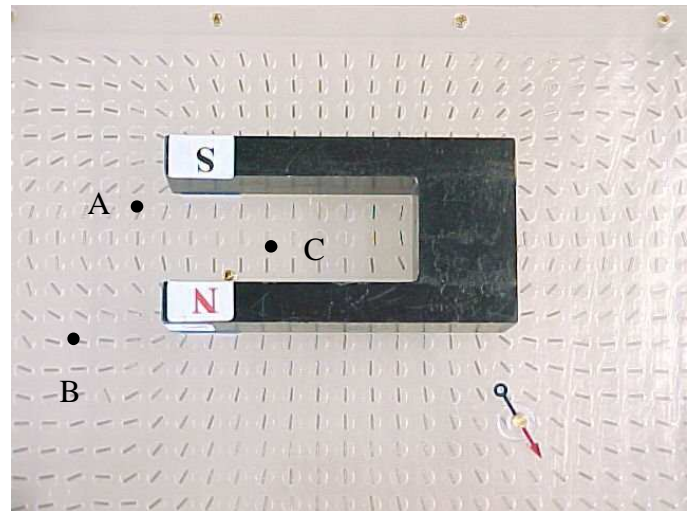
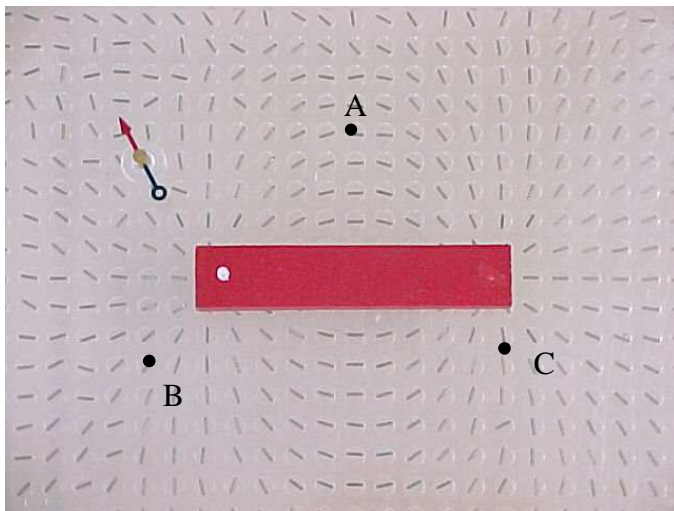
1. Indiquer la grandeur physique représentée sur cette carte. Préciser son type et son unité.
2. Quelle est la particularité des points appartenant à une même courbe de niveau ?
3. A quelle variation d'altitude, correspond l'écart entre deux courbes de niveau successives ?
4. Quels sont les points sur la carte qui ont la même altitude ?



## 2 – Champ magnétique

### 2.1 – Aimants permanents

Les photos suivantes illustrent le spectre d'un aimant permanent droit et d'un aimant permanent en U.



1. Comment sont orientés les barreaux en acier (ou les paillettes de limaille) en l'absence d'un aimant ? Le document montre que l'aimant droit a créé un champ magnétique  $\vec{B}$  dans son environnement. Il permet en outre de cartographier ce champ.

2. Tracer des lignes de champs sur le document, en les orientant arbitrairement du pôle Nord au pôle Sud.
3. Représenter le champ magnétique aux points A, B et C.

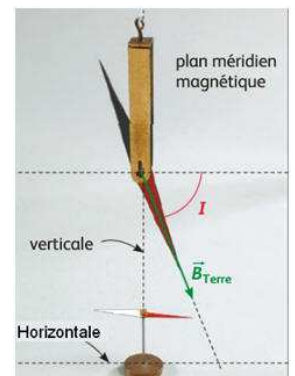
### 2.2 – Champ magnétique induit par un courant

On distingue les aimants permanents des électroaimants. L'expérience d'Oersted (p. 1) illustre comment il est possible de créer un champ magnétique à l'aide d'un dispositif électrique simple.

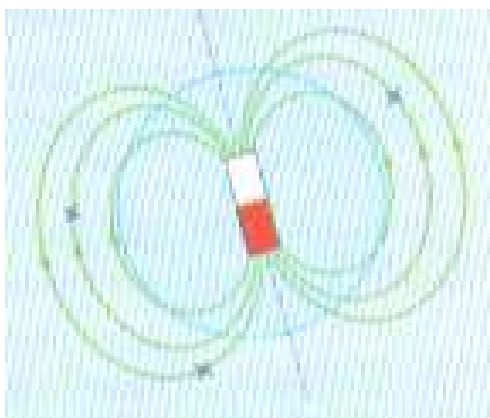
1. Quel est ce dispositif ? Faites un schéma.
2. Citer des applications de ce dispositif.

### 2.3 – Champ magnétique terrestre

La Terre génère également un champ magnétique, qui résulte des mouvements de matière dans ses profondeurs. Ce champ peut être modélisé par celui créé par un aimant droit placé à l'intérieur du globe.



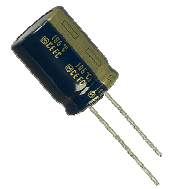
### Modélisation



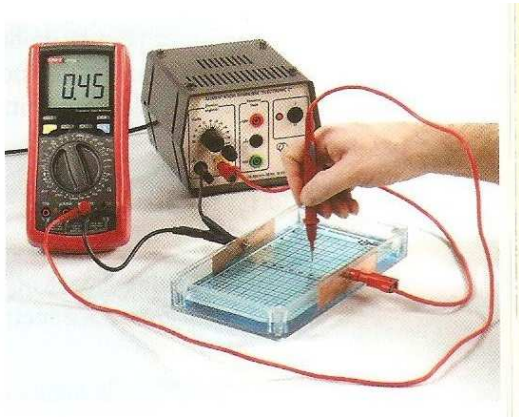
1. En utilisant l'orientation des lignes de champ, déterminer si la zone foncée de l'aimant correspond à un pôle Nord ou Sud. L'indiquer sur le schéma.
2. Représenter le champ magnétique aux points considérés.
3. L'aimant est légèrement incliné par rapport à l'axe de rotation de la Terre, d'un angle appelé déclinaison magnétique, dont la valeur dépend du lieu où l'on se trouve. Tracer grossièrement l'axe de rotation terrestre et indiquer les pôles Nord et Sud géographiques.
4. Une boussole est constituée d'une aiguille aimantée mobile : selon quoi s'oriente-t-elle ? Qu'indique-t-elle ?

### 3 – Champ électrostatique

Un condensateur plan est constitué de deux armatures métalliques planes et parallèles, proches l'une de l'autre, séparées par un isolant électrique. Ce dispositif a des propriétés électriques remarquables : il est extrêmement utilisé en électronique.



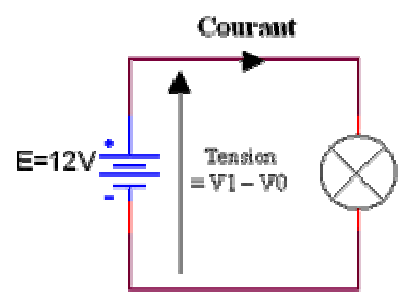
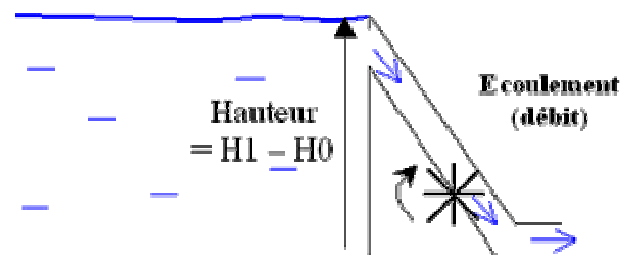
#### Modélisation



Il est constitué d'un générateur délivrant une tension continue de 5 V, d'une cuve rhéographique contenant une solution de sulfate de cuivre, dans cette cuve, deux plaques en cuivre sont disposées en vis à vis, l'une est reliée au pôle + du générateur, l'autre au pôle - du générateur. Un voltmètre monté en dérivation permet la mesure de différentes tensions.

Sous l'effet d'une tension appliquée entre les deux plaques, des électrons sont transférés d'une plaque à l'autre et les plaques acquièrent des charges opposées. Un champ électrique  $\vec{E}$  apparaît alors entre les deux armatures.

**NB** : comprendre (à peu près) l'électricité... Une analogie !



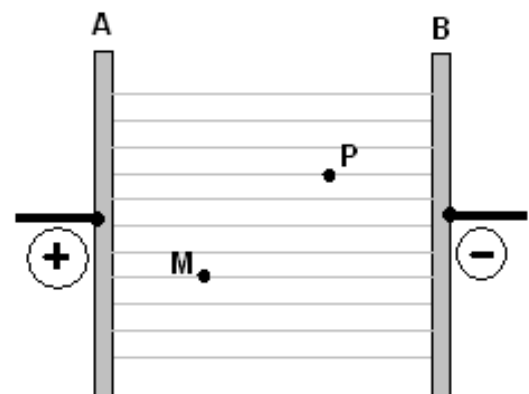
#### Travail à effectuer

Brancher la borne COMmune (masse) du voltmètre sur la plaque reliée au - du générateur et une sonde sur la borne V du voltmètre. Cette dernière permet alors de mesurer la différence de potentiel ou tension

$$U = V - V_{\text{COM}} > 0$$

1. A l'aide de ce dispositif, justifier par des relevés de tension que
  - a. les plaques + et - du condensateur constituent des équipotentielles
  - b. la tension est constante sur toute ligne parallèle aux armatures
2. Sachant que les lignes de champ sont par propriété perpendiculaires aux équipotentielles, compléter le schéma suivant, en faisant figurer les lignes de champ orientées.

3. Mesurer la tension  $U_x$  le long d'une ligne de champ, en fonction de la distance  $x$  à l'armature -. Etablir la relation entre  $U_x$  et  $x$ , et conjecturer la valeur du champ électrostatique au sein du condensateur, exprimée en  $\text{V.m}^{-1}$ .
4. Représenter le champ  $\vec{E}$  aux points M et P.
5. Conclure sur les propriétés du champ électrostatique régnant dans un condensateur plan polarisé avec une tension  $U$  et de distance inter-armatures  $d$ .



## 4 – Champ gravitationnel et champ de pesanteur

### 4.1 – Champ gravitationnel

L'action mécanique exercée par la Terre sur la Lune peut être modélisée par le vecteur force  $\overrightarrow{F_{T/L}}$  dont la valeur est donnée par la loi de gravitation universelle de Newton.

1. Rappeler la loi de gravitation universelle et donner les caractéristiques précises du vecteur  $\overrightarrow{F_{T/L}}$ .
2. Faire un schéma des astres dans le référentiel géocentrique et représenter  $\overrightarrow{F_{T/L}}$  en différentes positions de la Lune sur son orbite.

Tout objet massif modifie les propriétés de l'espace qui l'entoure (à la manière d'une boule de bowling sur une toile tendue) : les physiciens disent qu'il génère dans l'espace un champ vectoriel appelé champ gravitationnel  $\overrightarrow{\mathcal{G}}$  : ainsi, la Lune se situe dans le champ de gravitation terrestre  $\overrightarrow{\mathcal{G}_T}$ .

Ce champ est indépendant de la masse  $m_{\text{objet}}$  de l'objet qui le subit : ainsi, il est défini par  $\overrightarrow{\mathcal{G}_T} = \frac{\overrightarrow{F_{T/\text{objet}}}}{m_{\text{objet}}}$ .

3. Indiquer la direction, le sens et la valeur du champ  $\overrightarrow{\mathcal{G}_T}$ .
4. Pourquoi dit-on que le champ gravitationnel est *centripète* ?
5. A quoi ressemblent les zones d'uniformité du champ gravitationnel terrestre ?

### 4.2 – Champ de pesanteur

| Lieu                                     | Pôle Nord | Paris | Cayenne |
|------------------------------------------|-----------|-------|---------|
| g (premier modèle) en N.kg <sup>-1</sup> |           |       |         |
| g (forme) en N.kg <sup>-1</sup>          |           | -     |         |
| g (rotation) en N.kg <sup>-1</sup>       |           | -     |         |
| g (GOCE) en N.kg <sup>-1</sup>           | 9,832     | 9,809 | 9,780   |

– Tableau à compléter successivement –

#### a) Un premier modèle

De par sa masse, la Terre est à l'origine d'un champ gravitationnel : tout objet placé dans ce champ subit une force de gravitation attractive  $\overrightarrow{F_{T/\text{objet}}} = m_{\text{objet}} \times \overrightarrow{\mathcal{G}_T}$ .

Dans la vie quotidienne, ce champ est (en partie) responsable de la pesanteur, que l'on retrouve dans la définition du vecteur force modélisant l'action de la Terre sur les objets qui nous entourent : le poids.

1. Rappeler l'expression du poids P d'un objet de masse m si la pesanteur (ou gravité) est notée g.
2. A quel champ est-on tenté d'identifier la pesanteur terrestre ?
3. Donner alors l'expression de g en fonction de M<sub>T</sub>, R<sub>T</sub>, G et de l'altitude h.
4. Indiquer comment g varie avec l'altitude. Calculer g<sub>0</sub> = g(h = 0) et compléter la première ligne du tableau.
5. Calculer g(h = 1km) et estimer l'écart à g<sub>0</sub>. Commenter l'approximation selon laquelle, pour les expériences courantes, le champ de pesanteur terrestre peut être considéré *uniforme*.
6. Quelle est la pesanteur subie par les astronautes de l'ISS, à 400 km d'altitude ? Commenter la notion d'apesanteur (ou impesanteur).

#### b) Influence de la forme de la Terre

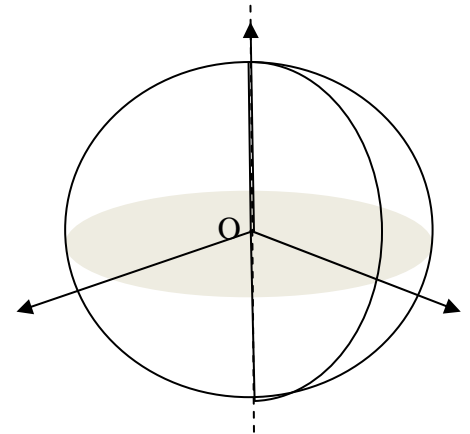
En 1672, l'astronome français Jean Richer constate qu'une horloge parfaitement bien réglée à Paris, retarde de plus de deux minutes par jour à Cayenne. Or, la période d'un pendule est directement liée à la valeur du champ de pesanteur local. Newton et Huygens attribuent ce retard au mouvement de rotation de la Terre sur elle-même et au fait que la Terre ne devait pas être une sphère mais une surface de révolution aplatie suivant l'axe des pôles.

Au XVIII<sup>ème</sup> siècle, l'Académie Royale décide d'envoyer deux expéditions pour mesurer la longueur d'un arc de méridien terrestre : l'une près du pôle Nord et l'autre près de l'équateur.

Bouguer et La Condamine allèrent au Pérou en 1735 ; Clairaut et Maupertuis en Laponie en 1736. Ces mesures confirmèrent les hypothèses de Newton et donc la forme aplatie de la Terre.

La Terre est une pseudo-sphère aplatie aux pôles. Ainsi, la distance du centre aux pôles est  $R_P = 6\,357$  km alors que le rayon de l'équateur est  $R_E = 6\,378$  km.

1. Représenter ci-contre le pôle Nord N, un point E de l'équateur et un point M quelconque placé à une latitude  $\varphi$  (variant de  $0^\circ$  à l'équateur à  $+90^\circ$  au pôle Nord).
2. Calculer  $g(P)$  et  $g(E)$  puis compléter la deuxième ligne du tableau. Commenter.



### c) Influence de la rotation de la Terre

La Terre est animée d'un mouvement de rotation uniforme autour de l'axe fixe des pôles.

La période de ce phénomène T correspond à la durée d'un jour sidéral soit  $T = 86\,164$  s.

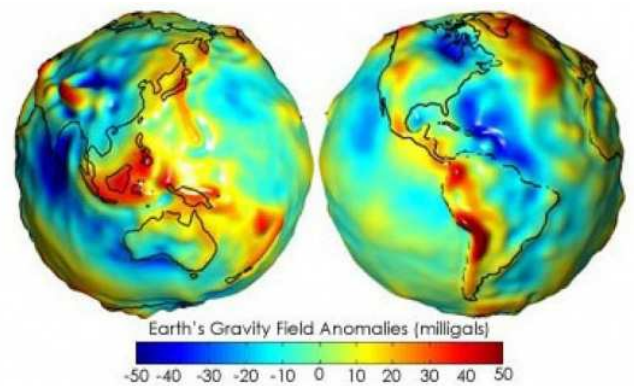
La valeur du champ de pesanteur en M dans le référentiel géocentrique est donnée par la relation

$$g(M) = \frac{G \cdot M_T}{R_T^2} - \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot R_T \cdot \cos \varphi$$

1. Comment appelle-t-on l'effet subi par les points M ou E ? Pensez à certaines attractions de foire, à une essoreuse à salade, ou encore à la gravité artificielle dans les vaisseaux spatiaux de SF.
2. Commenter les deux termes de cette relation. Quel est l'effet de la rotation de la Terre sur la valeur de son champ de pesanteur ?
3. Compléter la troisième ligne du tableau. Commenter.
4. **Bonus** : calculer la vitesse de rotation d'un tourangeau (latitude  $\varphi = +47^\circ$ ). Tourne-t-il plus vite ou moins vite qu'un marseillais ?

### d) Influence de l'inhomogénéité de la Terre

A partir des données recueillies par le satellite GOCE, les scientifiques affineront nos connaissances de la forme de notre Terre et établiront une carte à haute résolution du **géοide**, c'est-à-dire la surface de référence de notre planète ainsi que des anomalies gravitationnelles.



1. Comment expliquer (succinctement) les variations de gravité observées par GOCE ?
2. Peut-on envisager un modèle de champ de pesanteur qui soit fixe dans le temps ? Pourquoi ?
3. D'après vous, qu'est-ce qui motive aujourd'hui les recherches ?

### Données du IV

$$G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$$

$$R_T = 6\,371 \text{ km en moyenne}$$

$$M_T = 5,974 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

$$M_L = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$$

$$d_{TL} = 3,84 \cdot 10^5 \text{ km}$$