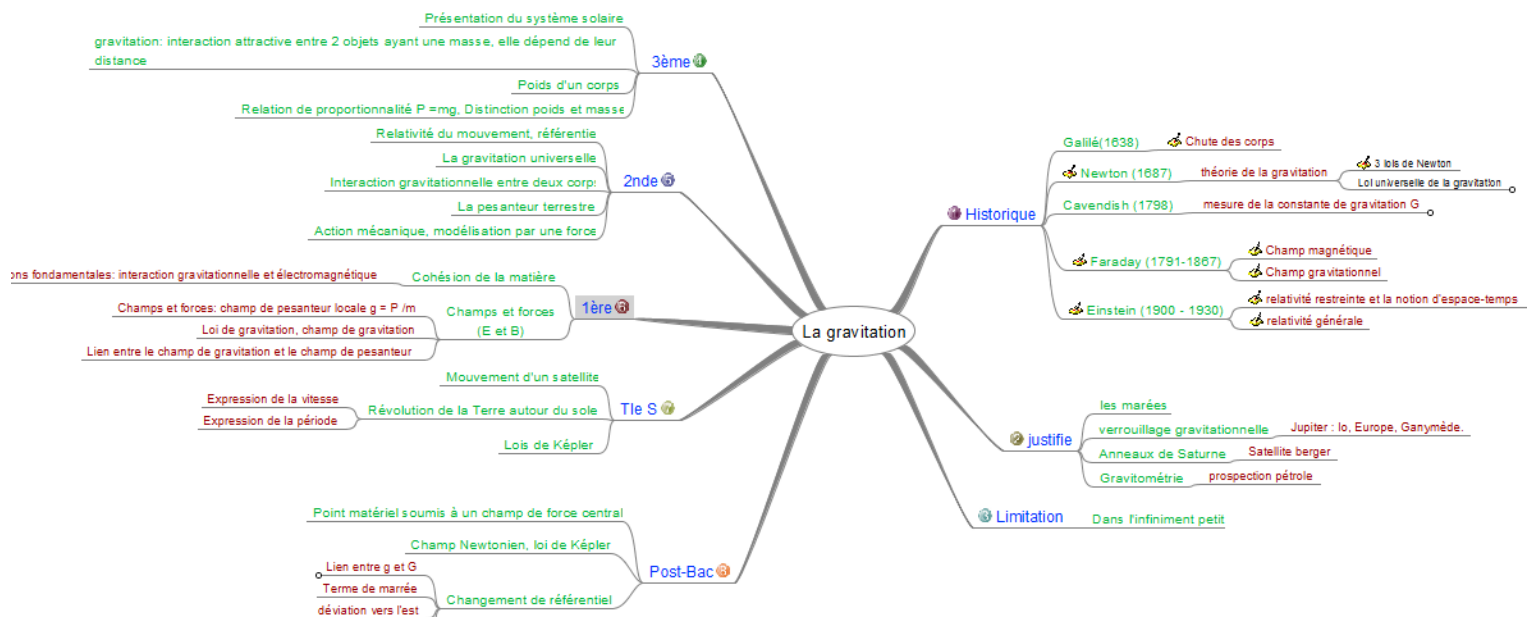


# 23e- Gravitation

## Intro : Carte Mentale



Insister dans la CM sur le fait qu'en 1<sup>ère</sup> S lorsqu'on aborde le thème champs et force on parle de champ E (électrostatique) et B (magnétique) tout aussi bien qu'on parler de champs G (de gravitation).  
Et dire qu'on va se servir de ça dans la partie post bac.

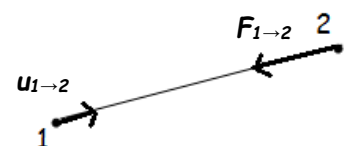
## Post Bac : Tec et doc 1<sup>ère</sup> Année MPSI (Grélias et Migeon) p869

**Livres :** Grélias PCSI édition 2009, Electromagnétisme(et le Tout en un MPSI-PCSI-PTSI, Electromagnétisme)

### I - Comparaison électrostatique et gravitation

Les lois de Newton et Coulomb sont quasi-identiques à la seule différence qu'il n'existe pas de masse négative, la gravitation s'exerce toujours dans le même sens, c'est-à-dire attractive.

On se place dans le cas d'une force de Coulomb attractive(il faut que les deux charges soient de signes opposés, d'où le fait que la force soit positive, donc négative sur  $u_{1 \rightarrow 2}$ ).



Par analogie :

|                   | Gravitation                                                                    | Electrostatique                                                                                      |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sources de champs | Masse $m$                                                                      | Charges $q$                                                                                          |
| Forces            | $F_{1 \rightarrow 2} = - G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$<br>Interaction de Newton | $F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$<br>Interaction de Coulomb |
| Constantes        | $- G$                                                                          | $1/ 4\pi\epsilon_0$                                                                                  |
| Champs            | $G(M)$                                                                         | $E(M)$                                                                                               |

### II - Le théorème de Gauss

En électrostatique, **le théorème de Gauss** est un outil essentiel pour calculer un champ électrostatique en tout point de l'espace, quand la symétrie du système le permet:

$$\Phi = \iint_{(\Sigma)} \mathbf{E}(\mathbf{M}) d\mathbf{S}_e = Q_{\text{int}} \text{ à } \Sigma / \epsilon_0 \text{ pour une distribution continue de charges}$$

On doit choisir une surface fermée  $\Sigma$  (définition donnée au début du chapitre):

- passant par le point M
- telle que la norme  $\|\mathbf{E}(\mathbf{M})\|$  soit identique en tout point de  $\Sigma$
- telle que  $\mathbf{E}(\mathbf{M})$  soit normal à  $\Sigma$  en tout point donc colinéaire à la normale extérieure.

La surface  $\Sigma$  est donc une équipotentielle.

Par analogie, en gravitation :  $-G \leftrightarrow 1/4\pi\epsilon_0$  donc  $1/\epsilon_0 \leftrightarrow -4\pi G$

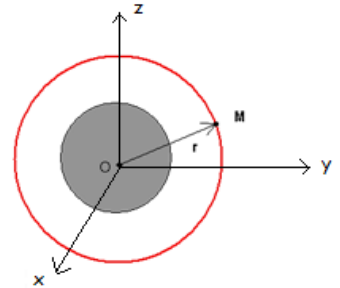
$$\Phi = \iint_{(\Sigma)} \mathcal{G}(\mathcal{M}) dS_e = -4\pi G M_{\text{int à } \Sigma}$$

### III - Application : Détermination du champ de gravitation

Grâce au théorème de Gauss, il est possible de déterminer le champ de gravitation  $\mathcal{G}$  et le potentiel  $V$  en point M.

Soit un corps sphérique, qu'on assimilera à la Terre, de masse  $M$ , de centre  $O$ , de rayon  $R$  et de masse volumique  $\rho$  que l'on supposera uniforme dans toute la sphère.

On a donc une distribution sphérique de masse.



#### a) Analyse des invariances

Une distribution de charges est invariante dans une transformation si le déplacement engendré par cette transformation laisse la distribution identique à elle-même. (Définition donnée au chapitre 33)

On invariance par rotation autour de  $O$  :  $\mathcal{G}(\mathcal{M}) = \mathcal{G}(r)$  et  $V(M) = V(r)$

Le champ de gravitation et le potentiel ne dépendent que de  $r$ .

#### b) Analyse des symétries

La droite  $OM$  est un axe de symétrie tous les plans passant par  $O$  et  $M$  sont des plans de symétrie, le champ est donc radial :

$$\mathcal{G}(\mathcal{M}) = \mathcal{G}(r) \mathbf{u}_r$$

#### c) Choix de la surface de Gauss

Dans le cas de la Terre on choisira une sphère de centre  $O$  et de rayon  $r = OM$  sur laquelle le champ gravitationnel est constant.

#### d) Application du théorème de Gauss

- Le flux s'écrit :

$$\Phi = \iint_{(\Sigma)} \mathcal{G}(\mathcal{M}) dS_e = \iint_{(\Sigma)} \mathcal{G}(r) dS_e = \mathcal{G}(r) \iint_{(\Sigma)} dS_e = \mathcal{G}(r) \cdot 4\pi r^2$$

**Rem :** on peut sortir  $\mathcal{G}(r)$  de l'intégrale car la norme du champ est la même en tout point de la surface et le champ est colinéaire à la normale à la surface donc le « cos » du produit scalaire vaut 1

#### - 1er cas : M à l'extérieur de la Terre, $r > R$

On suppose que la masse volumique de la Terre est uniforme donc constante d'où

$$M_{\text{int}} = \iiint \rho d\tau = \rho \cdot (4/3)\pi R^3 = M_T \quad \text{la masse intérieure à } \Sigma \text{ correspond à la masse totale de la Terre}$$

On a donc :

$$\mathcal{G}(r) \cdot 4\pi r^2 = -4\pi G \times M_T$$

$$\rightarrow \mathcal{G}(r) = -4\pi G M_T / 4\pi r^2$$

$$\rightarrow \mathcal{G}(r) = -G M_T / r^2$$

On remarque que le champ créé est le même que celui produit par une masse ponctuelle de masse  $M_T$  placée en  $O$  du corps sphérique

- 2ème cas : M à l'intérieur de la Terre,  $r < R$

$$M_{\text{int}} = \int \int \int \rho \, d\tau = \rho \cdot (4/3)\pi r^3$$

On a donc :

$$G(r) \cdot 4\pi r^2 = -4\pi G \times \rho \cdot (4/3)\pi r^3$$

$$\rightarrow G(r) = -4\pi G \rho \cdot r^3 / 3 r^2 \quad \text{on pose } M_T = \rho \cdot (4/3)\pi R^3$$

$$\rightarrow \boxed{G(r) = -G M_T r / R^3}$$

Remarque : il y a continuité du champ gravitationnel en  $r = R$  (normal pour une distribution volumique).

#### IV- Potentiel gravitationnel

En électrostatique le champ électrostatique dérive d'un potentiel  $E(M) = -\text{grad}(V(M))$

d'où par analogie  $G(M) = -\text{grad}(V(M))$

Dans le cas de la Terre, le champ étant radial :

$$G(r) = -dV(r) / dr \quad \rightarrow dV(r) = -G(r) \cdot dr$$

$$\rightarrow V(r) = -\int G(r) \cdot dr + \text{cte} \quad \text{cte : constante d'intégration}$$

- 1er cas : M à l'extérieur de la Terre,  $r > R$

$$V(r) = -\int -G M_T / r^2 \cdot dr + \text{cte} \quad \text{avec par convention } V(+\infty) = 0, \text{ donc cte} = 0$$

$$\boxed{V(r) = -G M_T / r}$$

- 2ème cas : M à l'intérieur de la Terre,  $r < R$

$$V(r) = -\int -G M_T r^2 / R^3 \cdot dr + \text{cte}$$

$$\boxed{V(r) = M_T G r^2 / 2R^3 + \text{cte}}$$

- Continuité du potentiel en  $r = R$

$$-G M_T / R = M_T G R^2 / 2R^3 + \text{cte}$$

$$\rightarrow \text{cte} = M_T G / 2R + G M_T / R$$

$$\rightarrow \boxed{\text{cte} = - (3/2) M_T G / R}$$

|                                                                    | Électrostatique                                                                                                                                     | Gravitation                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sources de champ                                                   | Charges fixes                                                                                                                                       | Masses                                                                                                                                |
| Champ défini à partir d'une loi de force                           | $\vec{F} = q \vec{E}$                                                                                                                               | $\vec{F} = m \vec{g}$                                                                                                                 |
| Champ à partir de sa source (indice 0)                             | Loi de Coulomb<br>$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0}{r^2} \vec{u}$                                                                      | Loi de Newton<br>$\vec{g} = -G \frac{m_0}{r^2} \vec{u}$                                                                               |
| Circulation conservative (le champ dérive d'un potentiel scalaire) | $\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = 0$<br>$\vec{E}$ dérive d'un potentiel électrostatique<br>$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$<br>(charge ponctuelle) | $\oint \vec{g} \cdot d\vec{\ell} = 0$<br>$\vec{g}$ dérive d'un potentiel gravitationnel<br>$V = -G \frac{m}{r}$<br>(masse ponctuelle) |
| Flux non conservatif (relie le champ à ses sources)                | $\oiint_{(\Sigma)} \vec{E} \cdot d\vec{S}_e = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$<br>(Th. de Gauss)                                                         | $\oiint_{(\Sigma)} \vec{g} \cdot d\vec{S}_e = -4\pi G M_{int}$<br>(Th. de Gauss)                                                      |

## Partie Péda.

**Séance d'intro le jour du 1<sup>er</sup> cours** : après avoir rappelé les règles et le fonctionnement des cours. Petite vidéo avec les planètes et le système solaire et on remarque que tout tourne dans l'univers.

### **Séance 1 : Démarche d'investigation 3<sup>ème</sup>**

**Pré-requis** : Avoir de l'imagination, avoir fait le cours sur le système solaire (avoir parlé de planète tellurique et gazeuse)

**Situation déclenchante** : Demander aux l'élèves d'essayer de faire prendre le virage à la bille en fer

Remarque : Certains élèves n'ont pas d'hypothèses

Demander aux élèves de noter leurs hypothèses sur du brouillon pour que ceux qui ont peur le fasse quand même

(Le mot « fer » leur donne l'idée d'utiliser un aimant)

**Tout tourne dans l'Univers : Comment expliquer ce mouvement circulaire ?**

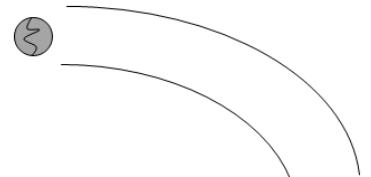
Hypothèse :

Votre mission est de faire prendre le « tournant » à cette bille ... si vous en êtes capable !

Liste du matériel :

|

Observation :



On s'inscrit dans la démarche scientifique : On demande aux élèves de rédiger un compte rendu en rappelant

- But
- Hypothèses (ils collent leurs brouillons)
- Protocole expérimental : (Explication + schéma)
- Observation
- Conclusion

A la fin de la séance débat entre les élèves pour essayer de convaincre les autres que leurs hypothèses est la meilleurs :

Principale hypothèses : **Il y'a un fil qui relie les planètes (mouvement de fronde), impossible car comme les planètes tournent dans le plan de l'écliptique alors ces dernières s'enrouleraient**

**Aimant avec la bille en fer** : c'est du à l'aimantation de la Terre (Terre constitué d'un noyau de fer) : impossible car les planètes gazeuses ne sont pas en fer et pourtant elles sont attirée par le Soleil

Remarque : Prendre 5 min pour expliquer comment faire une carte mentale

Travail maison : Donner un texte de Newton (Hatier 3<sup>ème</sup> page 196) + un texte ou il y a l'explication de la loi de la gravitation

Consigne : analyser le texte sous la forme d'une carte mentale et envoyer sur ma boîte mail votre carte mentale

Aucun problème pour les élèves pour le faire avec les moyens technologiques d'aujourd'hui, ils peuvent prendre une photo avec le portable et si vraiment ils n'ont aucun moyen de me l'envoyer ils doivent me la remettre dans mon casier

## Séance 2 : Etude de documents :

Reprendre l'étude de doc avec la carte mentale (en afficher certaines aux tableaux). A partir de ces cartes mentale on fait le cours ensemble.

Normalement il y'a un problème pour certains élèves : « Mais alors si tout s'attire pourquoi la Lune ne tombe pas sur la Terre ? »

Distribuer le texte manga science (Magnard page 160)

2<sup>ème</sup> partie de la séance :

Situation déclanchante : Vidéo de tintin sur la Lune. ( image dans le Magnard)

« Pourquoi sautent-ils plus haut ? Ont-ils fait un régime»

Document 1 : fonctionnement du dynamomètre, notion de force dont l'unité est le Newton (Ah tiens on retrouve ce bon vieux Newton !)

Document 2 : Rappel fonctionnement de la balance (masse et unité le kg)

Document 3 : Texte avec la masse de la Terre et celui de la Lune

Document 4 : Rappel ce que disait Newton à propos de tous les corps massique et de l'interaction entre eux.

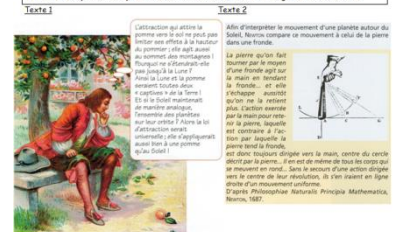
Consigne :

- A l'aide du document répondre au problème posé
- Vous pouvez vous aider en faisant une carte mentale

Jupiter XVI<sup>ème</sup> siècle, les astronomes pensaient que la Terre était le « centre du monde ». Après les travaux de Nicolas Copernic (1543), les astronomes « répliquent » le Soleil au centre du système solaire.

En 1685, Isaac Newton, célèbre scientifique britannique interrompu ses études au Trinity College de Cambridge pendant deux ans à cause de la peste qui sévit sur la ville. C'est pendant cette période qu'il fait ses plus grandes découvertes.

La tradition situe à la même époque « l'histoire de la pomme ». Assis dans son jardin, Newton aurait vu tomber une pomme et, à partir de là, aurait élaboré la théorie de la gravitation universelle.



Remarque : Insister sur le fait que la carte mentale et un outil très adapté à l'étude de document.

### **Séance 3 : Démarche d'investigation. TP coffre : (Proportionnalité entre P et m)**

**Pré-requis :** - Connaître la proportionnalité (normalement déjà était fait en math)

- Savoir tracer un graphique.

**Situation déclenchante:** Déposer un coffre sur le bureau avec un cadenas ( celui qui ouvre le coffre gagne ce qu'il y'a dedans)

Le coffre ne peut s'ouvrir qu'avec un code correspondant au poids du coffre. Seule donnée : sa masse =            !

Consigne :

- Trouver le poids du coffre et pour cela vous disposez de :
- Liste du matériel : d'un dynamomètre (100N max) de différentes masses, d'une balance !
- Rédiger un compte rendu avec ( But, protocole expérimentale (shéma + explication), observation (résultat), conclusion)

Remarque : impossibilité avec les masses de tomber pile sur la masse du coffre

Aide :

- Pour penser à la proportionnalité montrer une affiche publicitaire (1baquette 1,5 euros, 10 baguette 15 euros, combien vont couter 15 baguettes ?)
- Fiche méthode de construction de graphique et pour les bons élèves qui sont vraiment bon interdiction de faire des calculs pour les forcer à faire un graphique.

Remarque : est-ce judicieux de proposer une séquence entière ? Ne vaudrait-il pas mieux détailler juste une séance ? (je pense que oui)

### **Conclusion :**

#### **- Questions :**

- Pourquoi parler de gravitation dans cohésion de la matière en 1<sup>ère</sup> s ? Intérêt : montrer que la gravitation est négligeable devant l'interaction électrique
- Est-ce que la situation proposée avec les 3<sup>ème</sup> est réaliste ? trop de difficultés selon le public
- Quelles sont les limites de l'utilisation d'une distribution massique uniforme ? A l'intérieur de la Terre, en effet, la masse volumique n'est pas constante (mouvement de magma) mais si on regarde la Terre globalement, on la considère sphérique et uniformément massique
- Serait-il pas plus pertinent de laisser les élèves relier les points à main levée lors de la construction du graphique et après commenter pour parler d'erreurs de mesures ?

- Pourquoi est-ce intéressant de mesurer un champ à l'intérieur de la Terre ?

Utilisée dans la détection de neutrinos grâce à une cuve contenant du D<sub>2</sub>O enterrée à 2km sous terre. Voir à la fin du document ou sur le lien suivant :

[http://astro-canada.ca/\\_fr/a2115.php](http://astro-canada.ca/_fr/a2115.php)

#### **Exercice à faire en électromagnétisme (en rapport avec la cuve et détection de neutrinos):**

Une sphère, de rayon  $R$ , porte une charge volumique  $\rho$  qui est répartie uniformément dans tout le volume qu'elle occupe à l'exception d'une cavité de rayon  $a$ . Le centre de cette cavité est à la distance  $d$  du centre de cette sphère. La cavité est vide de charges.

En utilisant le théorème de Gauss et le principe de superposition, calculer le champ en tous points de la cavité.

### Questions possibles :

#### Sur la partie scientifique

1) Reprécisez-nous les plans de symétrie de la distribution de masse étudiée et leur conséquence sur la structure du champ de gravitation.

2) Pourquoi peut-on sortir  $A(r)$  de l'intégrale ci-dessous ?

$$\Phi = \iint_{(\Sigma)} G(r) dS_e = G(r) \iint_{(\Sigma)} dS_e$$

On calcule le champ sur une surface fermée, plus précisément sur une sphère. Le module de champ est constant sur toute cette sphère, on peut donc le sortir de l'intégrale.

3) Quel intérêt le résultat de votre calcul peut-il présenter pour un étudiant ou un chercheur ?

On peut déterminer le champ gravitationnel à l'intérieur de la sphère, en tenant compte du mouvement du magma, la masse volumique  $\rho(r)$  n'est plus considérée constante mais dépendant de  $r$ . Cela permet de modéliser le mouvement du liquide sans avoir à faire un bilan des forces sur chaque particule du liquide. Et donc par exemple faire des recherches sur l'inversion du champ magnétique terrestre.

4) Pourquoi la gravitation est négligeable dans l'infiniment petit et dominante dans l'infiniment grand par rapport aux autres interactions à distance ?

A l'échelle atomique, l'influence de la gravitation est négligeable car les particules sont très peu massives contrairement à l'interaction électrique. A grande échelle, la matière est neutre, l'interaction gravitationnelle est dominante.

Cela n'est possible que parce que la gravitation ne marche que dans un « sens »: elle attire et ne repousse pas, cette force ne peut donc que s'additionner contrairement à l'interaction électromagnétique.

Dominante à l'échelle de l'infiniment grand, la gravitation donc négligeable aux échelles accessibles en physique des particules.

5) Donner une forme locale du théorème de Gauss.

Cette équation est la forme intégrale de:  $\text{div } \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0$

6) A quoi sert le potentiel ?

La masse est source de champ gravitationnel, or ce champ dérive d'un potentiel. Ce n'est pas le cas pour le champ magnétique par exemple. On dit aussi que le champ gravitationnel est à circulation conservative ce qui est équivalent au fait qu'il dérive d'un potentiel. Pourquoi est-ce intéressant ? Car un potentiel est une grandeur scalaire ce qui est plus pratique à manipuler qu'une grandeur vectorielle. Par exemple on souhaite obtenir l'expression du champ gravitationnel en un point produit par plusieurs masses il est plus simple de sommer les potentiels produits par chacune des masses plutôt que de sommer les champs. On peut ensuite obtenir l'expression du champ en dérivant celle du potentiel.

#### Questions sur la partie pédagogique

1) Vous dites utiliser régulièrement la démarche expérimentale dans vos cours, pensez-vous que ce soit toujours pertinent ?

Bien entendu, la démarche expérimentale n'est pas toujours adaptée. La notion abordée peut impliquer des expériences non réalisables en milieu scolaire (soutis de matériel ou de sécurité).

De plus dans l'histoire des sciences, certaines théories ont été établies avant de les avoir prouvés expérimentalement.

2) Y a-t-il des exemples de découvertes scientifiques pour lesquelles l'expérience n'a pas précédé la théorisation ? Pouvez-vous nous citer des exemples ?

Par exemple, Mendeleïev se doutait qu'il y avait des éléments chimiques non découverts, il avait donc laissé des trous dans la classification périodique et en effet certains éléments ont été découverts plus tard.

Un exemple récent lié à la gravitation ?

Les ondes gravitationnelles (En physique, les ondes gravitationnelles sont des oscillations de la courbure de l'espace-temps. Albert Einstein en a prédit l'existence en 1918 en se basant sur sa théorie de la relativité

générale)

Autre :

- La plus grande est peut-être la déviation des rayons lumineux au passage d'un astre massif (étoile) prédit par A Einstein avec sa théorie de la relativité générale (1915). Prédiction confirmée en 1919 Eddington lors d'une éclipse de Soleil. C'est même Albert qui leur avait dit d'aller voir s'ils ne le croyaient pas. Il était tellement sûr de sa théorie qu'il n'est même pas allé voir !
- Il y a aussi la découverte du neutrino prédite par l'Italien Wolfgang Pauli en 1930 pour respecter la conservation de l'énergie dans une désintégration nucléaire. Confirmé en 1959.
- L'existence des trous noirs prédite dès la fin du 18ème siècle par un certain Pierre Simon Laplace.
- Le neutron prédit par Rutherford en 1920 et découvert par Chadwick en 1932.
- Les quarks prédits par la théorie de Murray Gell Man en 1961 et mis en évidence un peu après dans les accélérateurs

3) Discussion sur les limites de l'analogie pour la fronde et pour la bille tournante autour de l'aimant. Comment améliorer l'expérience de la fronde pour la rapprocher du mouvement de la Lune autour de la Terre ?  
??

## L'Observatoire de Neutrinos de Sudbury

### Le seul observatoire canadien situé sous terre

L'Observatoire de Neutrinos de Sudbury entre en fonction en 1999, à 2070 mètres sous terre, dans la mine Creighton, près de Sudbury, en Ontario. L'objectif de l'observatoire est de détecter et d'étudier les neutrinos émis par le Soleil et d'autres objets célestes. Sa création est le fruit d'une collaboration entre le Canada, les États-Unis et le Royaume-Uni.

Les neutrinos sont de petites particules élémentaires neutres (c'est-à-dire sans charge électrique) qui interagissent très peu avec la matière. Ils interagissent en fait si peu avec la matière que celle-ci leur paraît transparente, d'où la difficulté de les détecter pour les étudier.

Les étoiles en produisent de grandes quantités. Le Soleil, par exemple, émet 200 trillions de trillions de trillions de neutrinos à chaque seconde. Ainsi, à chaque instant, des milliards de neutrinos traversent le Soleil, la Terre et votre corps sans être gênés. Lors de votre vie, un ou deux neutrinos seulement parviendront à entrer en contact avec un des atomes de votre corps.

Un problème important concernant notre Soleil est précisément relié à sa production de neutrinos. Au début des années 1980, les théories semblent indiquer que le nombre de neutrinos solaires détectés par différents laboratoires est moins élevé que prévu.

Deux hypothèses s'offrent alors : soit que notre connaissance des processus opérant dans le Soleil est insuffisante, soit qu'une partie des neutrinos changent de forme lors de leur voyage vers la Terre (un phénomène connu pour affecter d'autres particules élémentaires), ce qui fait que le nombre de neutrinos détecté sur Terre est inférieur à celui produit par le Soleil.



En 1983, des chercheurs canadiens proposent de construire un détecteur de neutrinos souterrain dans une mine de nickel de la compagnie Inco, en Ontario. La nécessité de construire le détecteur sous terre provient du fait qu'il faut le protéger des radiations micro-onde émanant du rayonnement de fond cosmologique qui pourraient affecter la détection de neutrinos solaires.

Un an plus tard, en 1984, un chercheur américain présente une étude démontrant les avantages d'utiliser l'eau lourde (une eau dont les atomes d'hydrogène ont un neutron



supplémentaire) comme détecteur à neutrinos. Comme le Canada dispose d'une réserve d'eau lourde abondante, on décide alors de construire un détecteur fonctionnant sur ce principe. Les États-Unis se joignent alors au projet, suivis du Royaume-Uni en 1989.

Les travaux débutent en 1990 et se terminent 1999. Le détecteur est composé de 1000 tonnes d'eau lourde ultra-pure enfermée dans un récipient de plastique transparent de 12 mètres de diamètre. Le récipient est lui-même entouré de 7000 tonnes d'eau ordinaire ultra-pure logée dans une immense cavité de 22 mètres de largeur par 34 mètres de hauteur (soit l'équivalent d'un édifice de 10 étages). Il s'agit de la plus grande cavité réalisée à deux kilomètres de profondeur au monde.

À l'extérieur du récipient acrylique se retrouve une sphère géodésique de 17 mètres de diamètre munie de 9600 détecteurs qui décèlent la présence de neutrinos. La fréquence de détection est de un neutrino à l'heure.

Depuis sa mise en service, les résultats ont démontré que les neutrinos changent effectivement de forme lors de leur voyage du Soleil à la Terre, mettant ainsi fin à un vieux débat.