

# L'expérience de Cavendish

II- Les expériences de Henry Cavendish et de Sir Charles Vernon Boys.

Marie-Laurence Spagnol  
Observatoire de Lyon

**Résumé :** Suite au premier article paru dans les cahiers Clairaut n°102, nous allons décrire l'expérience de Henry Cavendish, qui est la première vérification expérimentale de la théorie de la gravitation énoncée un siècle auparavant par Newton. Il détermine la valeur de la constante de la gravitation universelle  $G$  sans en avoir le but initial. Par la suite, C. V. Boys reprend cette expérience. Il montre l'intérêt de réduire les dimensions du système pour obtenir de meilleurs résultats et confirme ceux obtenus par H. Cavendish.

**Mots-clefs :** GRAVITATION – HISTOIRE - EXPERIENCE

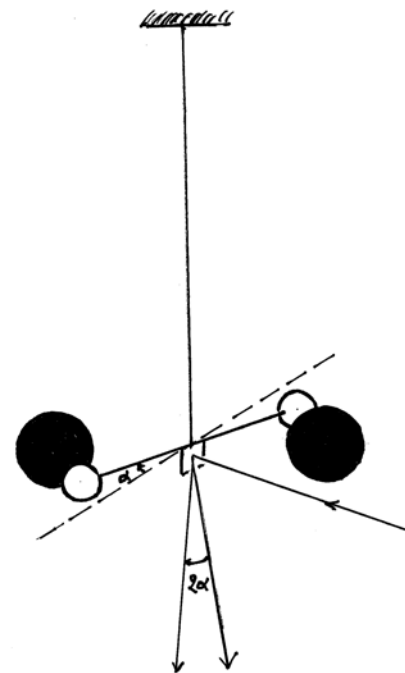
## Le principe de la balance de torsion

Les deux expériences que nous allons vous présenter, sont basées sur le principe de la balance de torsion.

Charles Augustin Coulomb (1736-1806) fut l'un des premiers à utiliser ce système. Pour démontrer que la force entre deux sphères chargées est en  $1/R^2$ , il utilise une balance qui établit l'équilibre entre la force électrique et la force de torsion. Pour les expériences de Cavendish (1798) et de Boys (1895), c'est l'attraction gravitationnelle qui est compensée par la force de torsion. Ce phénomène entraîne une torsion du fil qui maintient le système en équilibre.

Initialement, les grandes sphères sont dans une position stable. Lorsque l'on approche les grosses sphères des plus petites, la force d'attraction gravitationnelle entre les deux types de sphères va produire un couple tendant à faire tourner la tige. Les petites sphères s'approchent

des plus grosses jusqu'à ce que la torsion du fil équilibre le couple gravitationnel.



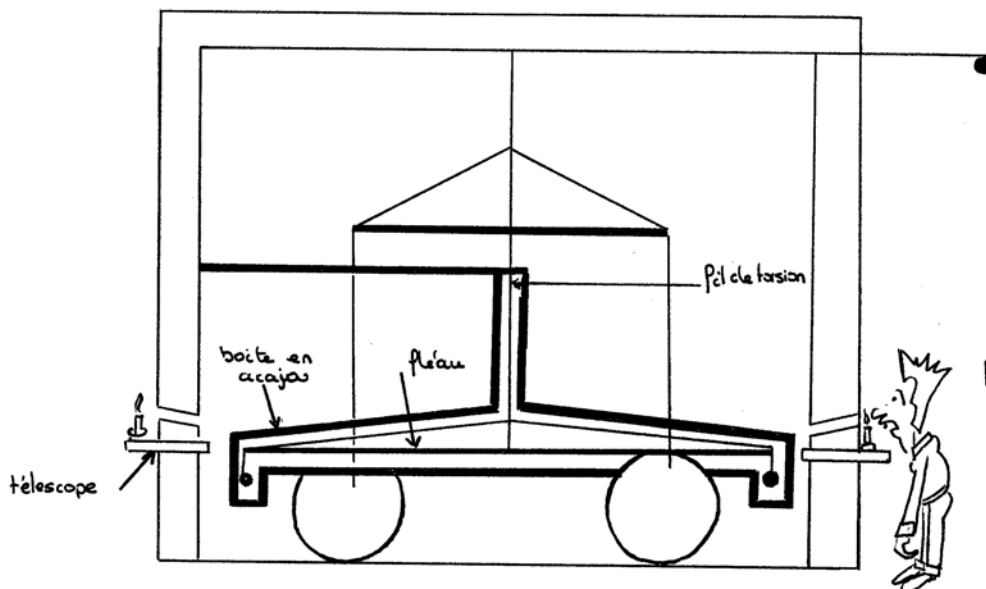
A la nouvelle position d'équilibre, il y a égalité entre le moment du couple de torsion et le moment provoqué par la force d'attraction. Cette condition va permettre d'obtenir une relation qui sera utilisée pour la détermination de la valeur de  $G$ . Lors du changement de positions des grosses sphères, le fléau, va passer d'un état d'équilibre à un autre. Il y aura rotation du fléau. La mesure de l'angle de rotation permettra de remonter au couple de torsion. Cependant ce couple fait intervenir les caractéristiques mécaniques du fil de suspension. Pour déterminer ces caractéristiques, il suffira de mesurer la période d'oscillation de la balance. Ainsi, la mesure de la période d'oscillation et la mesure de l'angle de rotation du fléau permettent d'obtenir la force d'attraction.

Pour déterminer l'angle de rotation du fléau, Cavendish faisait une mesure du déplacement d'une des extrémités. Boys utilisait un petit miroir solidaire du fléau. La déviation d'un faisceau optique réfléchi par le miroir permettait de mesurer l'angle avec une grande précision car la déviation du faisceau est double de celle du miroir (méthode de Poggendorf). De plus, du fait de l'utilisation de deux sphères attractives, utilisées dans un sens et dans l'autre, un gain supplémentaire d'un facteur quatre en résultait.

## La première mesure de la constante de la gravitation par Henry Cavendish

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, Cavendish n'a pas pour but initial de déterminer la valeur de la constante de gravitation universelle. Il veut calculer la densité moyenne de la Terre, ce qui est à l'époque une des grandes préoccupations. Pour réaliser ces mesures, il va utiliser une balance de torsion.

John Michell développe un instrument de mesure capable de mettre en évidence l'attraction de petites quantités de matières. Son instrument n'est pas parfaitement opérationnel et malheureusement, il meurt avant de pouvoir achever son projet. A sa mort, l'appareil est remis au révérend Francis John Hyde Wollaston, professeur à Cambridge, qui n'apporte pas de modification au montage car il n'a pas les commodités pour réaliser les expériences. C'est ainsi que Cavendish récupère l'appareil et le perfectionne afin de réaliser ses expériences. La rigueur et la précision qu'il apporte à ce montage sont remarquables pour l'époque et vont lui permettre d'obtenir de très bons résultats.



*Dispositif utilisé par H. Cavendish*

Une des balances de torsion utilisée par Cavendish est constituée d'un fléau de bois long de 2 mètres, léger et renforcé par un fil d'argent formant un triangle. Le fléau est suspendu horizontalement en son milieu, par un fil de torsion de 1 mètre, en cuivre argenté, maintenu à l'extrémité d'un support horizontal solidement fixé au mur. A chaque extrémité du fléau est suspendue une petite sphère de plomb de 5 centimètres de diamètres et pesant 730 grammes. Le tout est confiné dans une boîte en acajou pour protéger le dispositif des éventuelles perturbations venant de l'extérieur. Deux grandes sphères en plomb de 30 centimètres de diamètre et pesant 158 kilogrammes, sont suspendues à un système en bois et en cuivre. Elles sont positionnées à l'extérieur de la boîte en acajou. Le système de suspension est relié à un dispositif constitué de poulies, que l'on peut actionner de l'extérieur, permettant la modification de la position des grandes sphères. On démontre ainsi, l'existence de la force de gravitation entre deux masses comme l'avait prédit Newton.

Les forces engendrées sont si faibles (de l'ordre du micro newton), que l'expérience doit être protégée des éléments extérieurs. Cavendish doit isoler au maximum le dispositif. En plus de la partie confinée dans le coffrage en acajou, le montage entier est enfermé dans une pièce. Pour effectuer les mesures, il lui faut un dispositif permettant l'observation et le relevé des mesures de l'extérieur sans influencer la manipulation. Pour cela, il installe deux télescopes dans des trous creusés dans le mur de chaque côté de la pièce, ainsi que des lampes. L'extrémité du fléau se déplace devant une petite échelle en ivoire graduée permettant, avec un vernier solidaire du fléau, d'obtenir l'angle de torsion avec une grande précision. La lecture des mesures se fait à l'aide des télescopes et des lampes.

Lors de ses expériences, il amène les grosses sphères au plus proche des petites, confinées dans le coffrage, afin qu'elles subissent l'attraction gravitationnelle. Il y a un changement de la position d'équilibre et les deux centres de masse sont séparés de 22,5 centimètres. Il réalise la même opération lorsque les positions des

grosses sphères sont inversées. Il obtient l'angle de torsion et peut en déduire la valeur de G.

Il réalise deux séries de mesures avec deux fils de torsion de diamètres différents et garde les autres paramètres identiques. Le premier fil de torsion est en cuivre argenté, de 1 mètre de longueur et de  $0,0341 \cdot 10^{-3}$  mètre de diamètre. La période d'oscillation est de 15 minutes. En réalité, le fil est trop fin et donc pas assez rigide. Cela pose un problème car l'attraction des masses fait légèrement dévier les petites sphères vers le bord de la boîte. De plus un fil trop souple rend l'appareil trop sensible aux perturbations. Il réalise quelques mesures avec ce fil de torsion, afin d'étalonner son expérience. Il fait une deuxième série de mesures avec un fil de torsion qui possède les mêmes caractéristiques que le premier mais de diamètre  $0,05 \cdot 10^{-3}$  mètre. La période d'oscillation est alors de 7 minutes.

Cette expérience met en jeu une force de très faible intensité et nécessite beaucoup de précision pour obtenir une mesure acceptable. Lors de ses expérimentations Cavendish doit faire face à des contraintes qui perturbent ses mesures. Il doit adapter son dispositif aux effets extérieurs, comme les courants d'air ou les vibrations du sol. De plus, il remarque que les oscillations continuent longtemps après l'expérience. Il étudie ce phénomène et constate que cela provient d'une différence de température entre les grandes sphères et le coffrage en acajou. Ce gradient de température entraîne des courants de convection. Il faut donc enfermer le système dans une enceinte ayant des dimensions les plus petites possible. Cela permet aussi de limiter les variations de température au cours de la journée. Il doit prendre en compte les caractéristiques du fil de torsion afin d'optimiser ses mesures. La période d'oscillation doit être longue pour obtenir une bonne mesure, mais cela implique une augmentation des perturbations sur le système. Pour pallier ce problème, il se contente de prendre les trois premiers extremums et d'en déduire la position d'équilibre.

## Le résultat de ses travaux

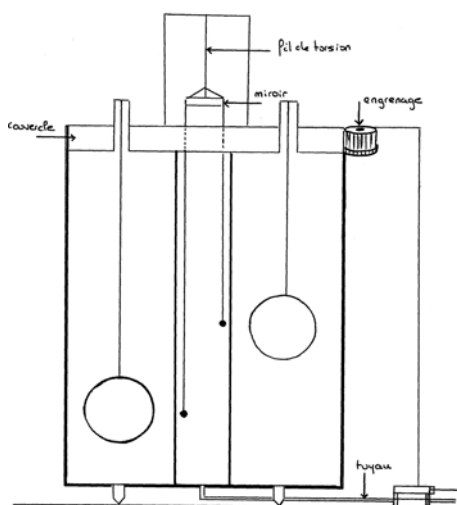
Par ce mode expérimental, il réussit à obtenir une valeur de la constante de la gravitation universelle  $G = 6,754 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$ . Cette valeur est obtenue avec une grande précision par rapport aux autres expériences de l'époque. Elle est comparable à la valeur du système international actuel car elle n'en dévie que de 1,2%. La force d'attraction est de l'ordre de  $1,54 \cdot 10^{-7} \text{ N}$ . La faible intensité de cette force, entraîne une très faible déviation du fléau. En utilisant la condition d'équilibre des moments, on obtient la valeur de l'angle de torsion de  $0,247^\circ$  avec le premier fil et avec le second fil, l'angle est de  $0,05^\circ$ . Ceci nous permet de juger de la difficulté de cette expérience, à travers ces mesures très faibles de grande précision.

Comme nous l'avons dit le but initial de Cavendish est de «peser la Terre», ce qu'il entreprend en comparant la force engendrée entre les deux masses,  $M$  et  $m$ , à l'attraction exercée par la Terre sur la même masse  $m$ , c'est à dire son poids  $mg$ . Cette comparaison lui permit d'exprimer la masse de la Terre sans avoir explicitement déterminé la valeur de  $G$ . Il trouve la masse de la Terre égale à  $5,98 \cdot 10^{27}$  grammes. Il calcule sa masse volumique, en utilisant le volume de la Terre de  $1,09 \cdot 10^{27}$  centimètres cubes. Il en conclut que la densité de la Terre est de 5,48. Cette valeur est une véritable surprise, à l'époque, mais elle sera confirmée par les mesures modernes qui donnent la densité de la Terre à 5,54.

## Les améliorations apportées par Sir Charles Vernon Boys

Contrairement à Cavendish, Boys ne désire pas mesurer la densité de la terre mais il considère comme capitale la détermination de la constante de gravitation universelle. Selon ses dires, «*Etant donné le caractère universel qui s'attache à la constante  $G$ , il me semble que c'est descendre du sublime au ridicule que d'annoncer les expériences dont je vais parler comme étant destinées à mesurer la masse de la Terre ou encore, avec moins de précision, le poids de la Terre.*»

Il base ses expériences sur le même principe que celui utilisé par Cavendish. Il étudie les caractéristiques du fil de torsion. Il remarque que plus la constante de torsion  $C$  est petite plus l'angle de torsion est grand. Or  $C$  varie avec le diamètre à la puissance quatre. Il en déduit l'avantage qu'il y a à réduire les dimensions du dispositif. En effet, l'utilisation de sphères plus petites, va lui permettre de faire une balance avec un fil de torsion de diamètre plus petit. Bien que cette modification entraîne une diminution de la force et par conséquent des couples que l'on cherche à mesurer, elle va permettre d'obtenir un angle de rotation plus grand et donc une mesure plus précise.



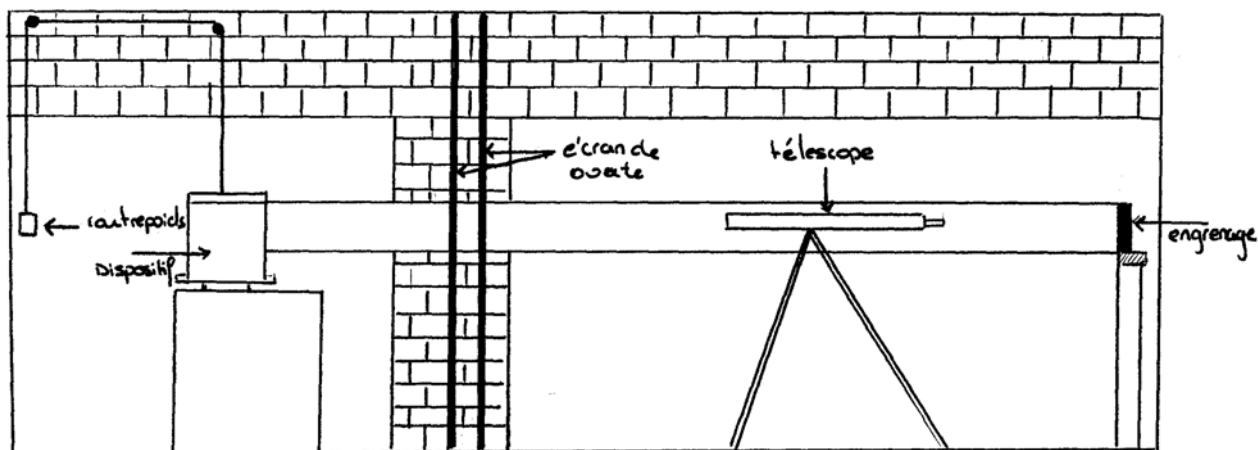
*Dispositif utilisé par C. V. Boys*

Il place son dispositif dans une caisse en laiton fermée par un couvercle. Un engrenage extérieur constitué d'un système de poulies avec des cordes permet de faire tourner, de l'extérieur, le couvercle qui supporte les grosses sphères. Dans un tube central, il place la balance de torsion. Le fléau est un miroir de 2,3 centimètres qui doit être léger et avoir une définition optique parfaite. Il le fixe sur un support en cuivre doré en forme de croix. A chaque extrémité s'accrochent les fils de suspension des petites sphères. Au départ les quatre masses sont dans le même plan. Il n'y a donc pas de couple de torsion agissant sur le fléau.

Ce fléau est suspendu à l'armature par un fil de quartz de 1 mètre et de 0,002 centimètre de diamètre. Il porte deux petites sphères en or de 2,7 grammes. Elles sont suspendues de chaque côté et positionnées de façon à ce que leur centre de masse corresponde à celui des grosses sphères. Boys fabrique lui même les deux types de sphères, pour qu'elles soient parfaites et homogènes. Les deux grosses sphères de 7,5 kilogrammes en plomb sont suspendues au couvercle par des fils

de bronze phosphoreux. Boys ajoute un système de contrepoids pour alléger le couvercle et limiter les frottements lors de la rotation. Les sphères situées de chaque côté du fléau ne sont pas suspendues à la même hauteur pour réduire l'attraction parasite de la sphère opposée et ne pas engendrer d'erreurs supplémentaires.

Comme Cavendish, Boys constate de fortes perturbations causées par une variation de la température en différents points de l'appareil. Pour pallier cette difficulté, il isole le système dans une double caisse de bois. Elle possède des parois remplies de ouate et des fenêtres en mica qui permettent de faire les mesures sans produire un déplacement de l'image. De plus, il effectue ces manipulations dans un souterrain dépendant du Clarendon Laboratory à Oxford, où il isole le système du reste du souterrain par des écrans de feutre.



*Laboratoire installé dans un souterrain*

Boys procède à des mesures minutieuses de la distance entre les fils qui supportent les deux types de sphères, de la masse des grosses sphères, de l'angle de déviation du fléau et de la durée des oscillations pour différentes conditions initiales.

Pour ne pas perturber le système, toutes les manipulations s'effectuent de l'extérieur. Les observations sont réalisées avec deux télescopes,

l'un utilisé pour la lecture des angles de déviation et l'autre pour lire la rotation du couvercle. Il installe une lampe qu'il peut déplacer derrière une échelle transparente afin de lire les mesures.

Pour être sûr de trouver la balance dans un état stationnaire et de permettre au système d'avoir une température uniforme, il attend trois jours avant de faire ses mesures. Il a pratiquement

étudié tous les paramètres qui sont susceptibles d'augmenter les erreurs. Mais il y en a un qu'il ne peut pas maîtriser; ce sont les vibrations du sol. Pour pallier ce problème, il réalise les mesures la nuit et le dimanche. Il réalise les meilleures mesures pendant la grève des charbonnages, durant laquelle les trains sont arrêtés. Son dispositif est tellement sensible que lors d'une de ces mesures, il observe une grande variation sans pouvoir l'expliquer. Il apprend plus tard que cela est dû à un tremblement de terre dont l'épicentre est situé en Roumanie.

Boys donne une valeur de la constante de gravitation universelle :  $G = (6,663 \pm 0,007) \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$ . Il confirme ainsi la valeur déduite des mesures de Cavendish et montre par sa précision l'intérêt qu'il y a à diminuer les dimensions.

## L'intérêt de la réduction des dimensions du dispositif

L'égalité entre les deux moments s'écrit (d étant la demie longueur du fléau et R la distance entre les sphères qui s'attirent):

$$C\alpha = 2GMmd/R^2.$$

De plus, on peut calculer la période d'oscillation à partir du moment d'inertie J et de la constante de torsion :

$$T^2 = 4\pi^2 J/C.$$

C'est à dire (si on assimile le moment d'inertie à celui des deux petites sphères.):

$$C = 8\pi^2 md^2 / T^2,$$

A partir de ces formules, on déduit que l'angle à mesurer est :

$$\alpha = GMT^2 / (4\pi^2 d R^2)$$

On voit bien que plus la période sera grande plus l'angle  $\alpha$  sera grand. Le fait de diminuer les dimensions va entraîner une diminution de la constante de torsion C, car elle est proportionnelle au diamètre à la puissance quatre. Par conséquent, il y a une augmentation de la période, ce qui permet d'obtenir un angle de déviation plus grand. Les mesures sont facilitées et on obtient des résultats plus précis.

En reprenant la valeur de G trouvée par Boys, on peut déterminer la valeur de la force entre les sphères attractives:  $F = 2,398 \cdot 10^{-10} \text{ N}$ . Les conditions d'équilibres étant les mêmes que celles

définies pour la manipulation de Cavendish, Boys obtient un angle de torsion de  $0,72^\circ$ , alors qu'avec le dispositif de Cavendish, on aurait obtenu un angle de  $0,009^\circ$ . Il y a donc un grand intérêt à diminuer les dimensions.

Boys, valide les résultats de Cavendish, qui paraissaient surprenants à l'époque. Il détermine une valeur de la constante de la gravitation universelle avec une grande précision et conclut que la densité moyenne de la Terre est de 5,527.

## Les mesures modernes

Depuis la première expérience réalisée par Cavendish, puis celle de Boys, la technique n'a jamais cessé d'être améliorée. En 1942, Heyl réalise la première mesure moderne. Il détermine la période du pendule pour deux positions différentes des masses attirantes. En 1969, une autre expérience est faite par R. D. Rose. Sur le même principe que celui de Cavendish. Un système permet à l'ensemble du montage de faire une rotation autour d'un axe vertical correspondant à l'axe de torsion. Les deux grosses masses tendent à faire bouger le pendule de torsion. Un mécanisme fait tourner l'appareil en sens inverse, de manière à annuler la déviation du pendule de torsion. Le fil de torsion est soumis à une accélération que l'on mesure pour déterminer la valeur de G. En 1986, on fixe la valeur officielle de la constante de gravitation universelle :

$$G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}.$$

Cette valeur est encore au cœur de discussions scientifiques, depuis que des scientifiques allemands ont annoncé avoir trouvé que la valeur de la constante de gravitation G était fautive de près de 0,6 %. Afin de vérifier ces propos, des scientifiques ont réactualisé l'expérience. Trois expériences ont été réalisées par différentes équipes de recherche, utilisant des méthodes modernes. Pour chaque expérience, ils obtiennent des valeurs de G très précises, qui sont en accord avec la valeur du système international et ne confirment pas les travaux allemands.

La loi de la gravitation universelle est validée pour des systèmes à grandes distances mais est-elle validée à des petites distances ?

Pour le vérifier, des mesures ont été réalisées à des distances différentes. Selon la

théorie de Newton, la loi en  $1/R^2$  est universelle, donc toujours valable pour deux objets éloignés d'une distance quelconque. Les valeurs de G obtenues présentent une légère variation par rapport à la valeur officielle du système international. Si on tient compte des incertitudes de ces valeurs, on ne peut pas conclure avec certitude que cette loi est valide pour des petites distances. Des mesures faites plus récemment, avec des technologies de pointe, laissent fortement

à penser que cette valeur est constante pour toutes les valeurs de la distance entre deux objets.

La théorie de la gravitation universelle et la constante G font encore l'objet de recherche. Afin de bien se rendre compte de la difficulté de l'expérience justifiant la théorie de Newton, nous avons refait l'expérience telle que H. Cavendish en 1798 ou C. V. Boys en 1895 l'avaient réalisée. **Dans le prochain numéro nous commencerons la description de la réalisation de cette expérience.**

### La constante G de la gravitation universelle varie-t-elle ?

L'idée de départ vient de l'hypothèse des grands nombres de P. Dirac.

Il remarque que pour des particules élémentaires de masse m et de charge e, le rapport entre une force électrique et une force gravitationnelle est égal à un nombre sans dimension de l'ordre de  $10^{-40}$ .

Il réussit à obtenir un nombre sans dimension aussi grand en combinant deux quantités physiques:  $\tau$ , le temps de traversée d'une particule avec la vitesse de la lumière dans le vide c, et T, l'âge de l'univers, le plus grand temps possible.

Cette coïncidence numérique donne une expression reliant les constantes fondamentales : c, G ainsi que T, e et m. L'âge de l'univers varie au cours du temps. Par conséquent, au moins une de ces grandeurs devrait varier. Selon Dirac, La charge élémentaire e est bien définie, de même que la masse m. Il en déduit que c ou G sont susceptibles de varier au cours du temps. La valeur de c imposant trop de remises en cause, il pense donc que G n'est pas une constante. Elle serait alors inversement proportionnelle à l'âge de l'univers.

Cette idée de variation des constantes fondamentales a récemment été rediscutée après les mesures de John Webb sur des quasars lointains, mesures selon lesquelles la constante de structure fine  $\alpha = \mu_0 c e^2 / 2h$  aurait variée.