

**MICROSCOPE,**  
**le test du Principe d'équivalence**  
**et la recherche de nouvelles forces**

**Pierre FAYET**

*Bureau des Longitudes / ENS, Paris, 4 mars 2020*

## **Microscope, le test du principe d'équivalence, et la recherche de nouvelles forces**

Le satellite Microscope a été **lancé de Kourou le 25 avril 2016**.

Il a pour but de tester dans l'espace  
le **principe d'équivalence** avec une précision inégalée.

Selon ce principe,  
**deux masses au même point, soumises à la seule force de gravitation,  
doivent avoir la même accélération.**

D'où vient ce principe ?

Pourquoi et comment le tester, avec une précision toujours plus grande ?

Pourrait-on observer des déviations, et comment les interpréter ?

Quels sont les résultats obtenus, et que peut-on en déduire ?

**Tous les corps tombent-ils avec la même accélération ?**

Dans le vide bien sûr !

*On sait bien que, dans l'air,  
le "kilo de plumes" et le "kilo de plomb" ne tombent pas de la même manière  
et on sait bien aussi pourquoi ...*

Si l'on veut étudier l'action de la seule force de gravitation,  
qui fait que tous les corps sont attirés par la Terre,  
il faut pouvoir s'affranchir de toutes les autres forces parasites,  
comme la résistance de l'air , ...

**Tous les corps tombent-ils,  
dans le vide, et en l'absence de toute autre force parasite,  
avec la même accélération ?**

Ceci semble vrai.

Une longue série d'expériences l'a progressivement établi,  
avec une précision toujours meilleure.

(Galilée, Newton, Bessel, Eötvös, ... , Adelberger *et al.*)

### Les tests historiques de l'universalité de la chute libre

L'expérience (mythique) de **Galilée** depuis le haut de la **tour de Pise** ( $\sim 1591$ )

(qui n'aurait probablement jamais été réalisée ..)

Galilée observe que **le temps de chute est le même pour tous les corps**,  
quelles que soient leur masse, leur taille et leur nature.

On doit a priori distinguer:

la masse gravitationnelle  $m_g$  (sur qui la gravitation agit, via  $\vec{F} = m_g \vec{g}$ )

et la masse inerte  $m_i$

(qui intervient dans la relation fondamentale de la dynamique  $\vec{F} = m_i \vec{a}$ )

Observer que tous les corps chutent de la même manière (dans le vide) permet  
d' identifier la masse inerte et la masse gravitationnelle

**Newton** le vérifie en 1687:

des pendules de même longueur oscillent avec la même période

(précision  $\approx 10^{-3}$ )

Equation du mouvement du pendule simple:  $m_i l \ddot{\theta} = -m_g g \sin \theta$

( $m_i$  masse inerte,  $m_g$  masse gravitationnelle)

$$\theta \text{ petit} \Rightarrow \ddot{\theta} \simeq -\omega^2 \theta, \quad \text{avec} \quad \omega^2 = \frac{m_g g}{m_i l}$$

$$\text{Période } T = 2\pi \sqrt{\frac{m_i l}{m_g g}} \equiv 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad \text{si } m_g = m_i$$

Test amélioré par Bessel vers 1830  $\rightarrow$  Précision de  $\approx 10^{-5}$

Le physicien hongrois **Loránd Eötvös**,

*baron de Vásárosnamény (1848-1919)*

le confirme à l'aide de pendules de torsion faisant intervenir la rotation de la terre

avec une précision  $\approx 10^{-8}$

“Expériences d’Eötvös” (1885 ..., 1906-1909 ...)

Travail publié après sa mort, en 1922, dans Annalen der Physik

L. Eötvös, D. Pekár and E. Fekete, Ann. Phys. (Leipzig) 68, 11 (1922)

**“Beiträge zum Gesetz der Proportionalität von Trägheit and Gravität”**

Toutes ces expériences ont progressivement établi,  
avec une précision toujours meilleure, que la gravitation agit bien sur les corps  
proportionnellement à leur masse ( “inerte”)

“Tellement vrai” que ceci a été formulé comme  
**un principe fondamental, le Principe d’Équivalence.**

Celui-ci postule une équivalence, ou même identité, entre  
la **masse gravitationnelle**  $m_g$  (sur qui la gravitation agit)  
et la **masse inerte**  $m_i$  (qui intervient dans la relation  $\vec{F} = m_i \vec{a}$ )

Ecrire que

$$\vec{F} = m_g \vec{g} = m_i \vec{a}$$

c’est aussi écrire que  $\vec{a} = \vec{g}$ , en toutes circonstances

Tous les corps sont (ou doivent être) soumis, en un point donné,  
à la même accélération due à la force de pesanteur,  
indépendamment de leur composition (et autres caractéristiques)

$\vec{g}$  est appelé l' "accélération de la pesanteur"

Le principe d'équivalence traduit

***l' UNIVERSALITÉ DE LA CHUTE LIBRE***

des corps dans le vide

Du coup, la gravitation peut être "effacée" par le choix d'un référentiel en chute libre.

*(Elle apparaît alors, en quelque sorte, comme une force d'inertie*

*liée au choix d'un référentiel particulier, plutôt que d'un référentiel en chute libre)*

Ce fait expérimental, ainsi promu en Principe d'équivalence,

a été utilisé par Einstein comme point de départ de sa théorie de la relativité générale.

**Tester le principe d'équivalence, c'est donc  
tester l'une des hypothèses de base de la relativité générale.**



Les expériences qui testent le Principe d'équivalence mesurent,  
pour deux masses d'épreuve de compositions différentes,  
le **paramètre d'Eötvös** qui caractérise la **différence relative de leurs accélérations**

$$\delta_{12} = \frac{a_1 - a_2}{(a_1 + a_2)/2} \simeq \frac{a_1 - a_2}{g}$$

Quelles sont les meilleures limites sur ce paramètre (avant MICROSCOPE) ?

Expériences d'**Adelberger** *et al.* (Eöt-Wash, Seattle) (balances de torsion)

$$\begin{cases} \delta(\text{Be, Ti}) = (0.3 \pm 1.8) \times 10^{-13} \\ \delta(\text{Be, Al}) = (-0.7 \pm 1.3) \times 10^{-13} \end{cases}$$

Expériences de **Téléométrie lunaire** (Lunar Laser Ranging experiments)

⇒ La Terre et la Lune sont attirées de la même manière par le Soleil  
(malgré des compositions différentes, et des auto-énergies gravitationnelles différentes)

$$\delta(\text{Terre-Lune}) = (-0.8 \pm 1.3) \times 10^{-13}$$

**Le principe d'équivalence est donc valable au niveau de précision de quelques  $10^{-13}$**

Le principe d'équivalence est valable au niveau de précision de quelques  $10^{-13}$

Ceci est-il suffisant ?

**Pourquoi nous préoccuper de continuer à tester la validité de ce principe ?**

A cause de son rôle fondamental  
d'éventuelles violations auraient des implications considérables.

De telles violations pourraient-elles se produire ?

**Ceci pourrait remettre en cause la Relativité Générale  
qui est la théorie de la gravitation**

Conséquences principales très bien testées expérimentalement:

Avance du périhélie de Mercure  
Courbure des rayons lumineux et mirages gravitationnels  
Ralentissement des horloges dans un champ de gravitation (effet Einstein)  
Trous noirs – Ondes gravitationnelles

## Les équations d'Einstein et le principe d'équivalence

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} ,$$

### La gravitation se couple de la même manière à toutes les formes d'énergie

indépendamment de leur nature

#### **Traduction mathématique du principe d'équivalence:**

La gravitation agit de la même manière sur toutes les masses d'épreuve  
indépendamment de leur composition

D'ailleurs toutes, si elles sont “libres”,

(i.e. soumise à la seule force de gravitation induite par la courbure de l'espace-temps)

vont localement “tout droit”

c'est à dire en suivant une géodésique de l'espace-temps

trajectoire de longueur extrême dans l'espace-temps

(maximisation du temps propre vécu par la particule)

Mais alors, **pourquoi remettre en cause la relativité générale**

si ses conséquences sont aussi bien testées ?

La **relativité générale** (telle qu'elle est formulée)

n'est **pas compatible avec la physique quantique**

(théorie quantique des champs)

*Impossibilité de calculer des processus quantiques  
faisant intervenir plusieurs fois l'interaction gravitationnelle*

les diagrammes avec boucles ont des divergences, que l'on ne sait pas traiter  
même si cela ne devient vraiment problématique que pour des énergies extrêmement élevées

Ceci traduit la nécessité de modifier, ou compléter, la R. G.

Mais comment ?

Supergravité ? Dimensions supplémentaires ? Théorie des cordes ? Autres approches ?

On ne sait pas ...

Il est raisonnable de penser que l'inclusion de la R.G. dans un cadre plus vaste  
conduise à considérer, à côté du **graviton, de spin 2,**  
**d'autres champs, de spin 1 ou 0,**  
qui pourraient contribuer à modifier les lois de la gravitation.

Indépendamment de cela

*Tester le PE, c'est  
non seulement tester l'un des principes de bases de la RG  
mais aussi l'existence possible de nouvelles forces à longue portée !*

NPB 347 (1990) 743 ...

<https://link.springer.com/content/pdf/10.1140/epjc/s10052-016-4568-9.pdf>

## L'expérience MICROSCOPE de test dans l'espace du Principe d'Équivalence

**MICRO** Satellite à traînée compensée pour l'**O**bservation du **P**rincipe d'**E**quivalence

ONERA - CNES - OCA + ESA - ZARM (Brême) ...

**Pierre Touboul - Gilles Métris - Manuel Rodrigues**

**et toute l'équipe de MICROSCOPE**

<https://microscope.onera.fr>

<https://cnes.fr/fr/microscope-la-gravitation-mise-a-lepreuve>

<https://microscope.cnes.fr/fr/>

*Longue suite de projets de tests dans l'espace du PE*

d'abord **STEP** (NASA, puis proposé à l'ESA en 1993)

ensuite QuickSTEP, GeoSTEP ... et finalement **MICROSCOPE**

décision du passage en phase de réalisation en 2011

**Lancement le 25 août 2016**

**Lancement le 25 août 2016**

publication des premiers résultats fin 2017

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.119.231101>

<https://arxiv.org/pdf/1712.01176.pdf>

désorbitation en octobre 2018 – analyses des résultats en cours

**Comparer les mouvements de deux masses d'épreuve en chute libre dans le vide**

**Sur terre:** une expérience de chute libre dans le vide ne peut pas durer très longtemps:  
~ 10 s

(tour de Brême, hauteur de chute 110 m, temps de chute libre 2 fois 4,7 s)

<https://www.zarm.uni-bremen.de/en/drop-tower/general-information.html>

⇒ **aller dans l'espace**

comparer les mouvements de “chute libre” de deux masses d'épreuve  
en orbite autour de la Terre

Il faut aussi être dans le vide

**Les deux masses d'épreuve doivent avoir un mouvement libre  
à l'abri à l'intérieur d'un satellite**

Oui, mais le satellite lui-même n'est pas dans le vide, et est donc freiné

(résidus d'atmosphère, ...)

Il faut donc un mécanisme de “**compensation de traînée**”

qui permet au satellite de caler son mouvement  
sur celui des masses d'épreuve, à l'abri à l'intérieur

Utilisation de **micro-propulseurs à gaz froid**

capables de fournir des poussées très faibles



## Comparer les accélérations $a_1$ et $a_2$ des masses d'épreuve au même point

Comment est-ce possible ?

- 1) **Masse extérieure creuse** (masse intérieure pleine)
- 2) Minimiser les **interactions parasites des moments multipolaires**  
avec les gradients de gravité  
Masses de forme cylindrique  
approchant des “monopoles gravitationnels” sans symétrie sphérique  
mais dont les moment multipolaires sont néanmoins tous nuls  
<https://arxiv.org/abs/gr-qc/9611051>
- 3) **Masses asservies** pour que **leurs centres, et axes, coïncident à tout  $t$**   
Accélération relative déduite de la **force électrostatique** à appliquer  
Lorsque le satellite garde une orientation fixe par rapport aux étoiles  
Les masses ressentent la gravité le long des axes des accéléromètres  
**à la fréquence du mouvement orbital**  
(de plus, rotation du satellite autour de l'axe  $\perp$  plan orbital, à  $\sim 10^{-3}$  Hz  
pour rechercher un signal à la fréquence somme,  **$f_{EP} = f_{orb} + f_{spin}$** )

## Deux accéléromètres différentiels électrostatiques

T-SAGE (Twin Space Accelerometre for Space Gravity Experiment) (ONERA)

Mesure de force, par méthode électrostatique

→ accélération relative des masses d'épreuve

Alliages de **Titane** (+ Aluminium 6 %, Vanadium 4 %)  
et **Platine** (+ Rhodium 10 %)

Un instrument (SUEP) mesure  $\delta$  (Ti-Pt)

Un deuxième (SUREF)  $\delta$  (Pt-Pt), à titre de vérification,  
et doit trouver 0, dans la limite des incertitudes expérimentales

Analyse très délicate, pour rechercher une différence d'accélération extrêmement faible  
à une fréquence particulière connue  $f_{EP} = f_{orb} + f_{spin}$

$$f_{orb} = 1.6818 \times 10^{-4} \text{ Hz} \quad (T_{orb} \simeq 1 \text{ h } 39 \text{ mn } \dots)$$

$$f_{spin} = 2.9432 \times 10^{-3} \text{ Hz, or } 0.5886 \times 10^{-3} \text{ Hz } \dots$$

## Les résultats

$$\delta(\text{Ti, Pt}) = (-.1 \pm .9 (\text{stat}) \pm .9 (\text{syst})) \times 10^{-14}$$

$$\text{soit } |\delta| < 2.5 \times 10^{-14} \text{ à } 2\sigma$$

$$\delta(\text{Pt, Pt}) = (.4 \pm .4 (\text{stat})) \times 10^{-14} \text{ (compatible avec 0)}$$

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.119.231101>

<https://arxiv.org/pdf/1712.01176.pdf>

*Que peut-on en déduire ?*

- **Le principe d'équivalence reste valable**
- **Contraintes sur l'intensité d'une force supplémentaire** (“cinquième force”)  
pouvant ajouter ses effets à la gravitation  
et conduire à des violations (apparentes) du PE

***Mais pourquoi une force supplémentaire ?***

Trois des quatre forces (ou interactions) fondamentales sont très bien décrites par

**Le MODÈLE STANDARD de la PHYSIQUE des PARTICULES**

la *gravitation* étant bien décrite, au niveau classique, par la Relativité générale

interactions **fortes, électromagnétiques et faibles** des quarks et leptons

symétrie (de jauge)  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

bosons médiateurs des interactions (spin 1) : **gluons,  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$ , photon**

fermions (spin- $\frac{1}{2}$ ) :

<b>6 leptons:</b>	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$
<b>6 quarks:</b>	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$

boson de Brout-Englert-Higgs (spin 0) :  **$H$**

Magnifique construction. Nombreux succès !

## **Mais est-ce la fin de l'histoire ?**

*Pouvons-nous prétendre connaître toutes les particules  
et, avec la gravité (décrite par la relativité générale),  
l'ensemble de leurs interactions ?*

*Ce serait bien présomptueux ...*

D'autant que **de très nombreux problèmes subsistent**

concernant aussi bien la gravitation (non-compatibilité avec la théorie quantique)

que la physique des particules

(problème des familles, origine des symétries et brisures de symétrie,

nature de la matière sombre et de l'énergie sombre, éventuelle unification des interactions ...)

⇒ physique “**au-delà du modèle standard**”

faisant intervenir, le plus souvent,

de **nouvelles particules**, et de **nouvelles forces**

## ***Une nouvelle force à longue portée ?***

Groupe de symétrie  $\rightarrow \underbrace{SU(3)_C \times SU(2) \times U(1)}_{\text{gluons, } W^\pm, Z, \text{ photon}} \times \mathbf{extra-U(1)}$

**Boson  $U$  de spin 1**, médiateur d'une nouvelle interaction, de portée

$$\lambda_U = \frac{\hbar}{m_U c} \simeq 1\,973 \text{ km} \frac{10^{-13} \text{ eV}/c^2}{m_U} \text{ pouvant être grande } \rightarrow \infty$$

On attend des couplages proportionnels à  $B$  et  $L$ , ou  $B-L$  en **grande unification**

NPB 187 (1981) 184; 347 (1990) 743

<https://link.springer.com/content/pdf/10.1140/epjc/s10052-016-4568-9.pdf>

ou pour un médiateur **de spin 0 “de type dilaton”** (Damour-Polyakov, NPB 423 (1994) 532, ....)

couplages faisant intervenir aussi l'énergie électrostatique, ...

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.120.141101>

## **Couplages pas exactement proportionnels aux masses**

$\Rightarrow$  En se superposant à la gravitation, violations (apparentes) du principe d'équivalence

## Violations du Principe d'Équivalence

Pour un couplage à  $B$ : 
$$V(r) = -\frac{G_N m_a m_i}{r} \left[ 1 + \alpha_{gB} \left(\frac{B}{A_r}\right)_a \left(\frac{B}{A_r}\right)_i e^{-r/\lambda} \right]$$

Couplage à  $B$   $\epsilon_B e \Rightarrow$  intensité de la nouvelle force / gravité

$$\alpha_{gB} \simeq \mp \frac{\alpha}{G_N m_p^2} \epsilon_B^2 \simeq \mp 1.25 \times 10^{36} \epsilon_B^2.$$

Exemple:  $\alpha_{gB} \approx 10^{-12} \longleftrightarrow \epsilon_B^2 \approx 10^{-48}$

nouvelle force < gravité par  $\approx 12$  ordres de grandeur

violations (apparentes) du principe d'équivalence  $\approx 10^{-15}$

Violations du PE:  $\delta(\text{Ti-Pt}) \simeq \alpha_{gB} \Delta \left(\frac{B}{A_r}\right)_{\text{Ti-Pt}}$

MICROSCOPE: 
$$\underbrace{\delta(\text{Ti-Pt})}_{< 2.5 \times 10^{-14}} = \alpha_{gB} \underbrace{\left(\frac{B}{A_r}\right)_{\oplus}}_{\simeq 1.0008} \underbrace{\Delta \left(\frac{B}{A_r}\right)_{\text{Ti-Pt}}}_{\simeq .00079} \simeq \mp 10^{33} \epsilon_B^2$$

$$|\alpha_{gB}| < 3.2 \times 10^{-11}, \quad |\epsilon_B| < 5 \times 10^{-24}$$

Une nouvelle force couplée à  $B$  doit être  
 $< 3 \times 10^{-11} \times$  gravitation, ou  $< 2.5 \times 10^{-47} \times$  électromagnétisme

<https://journals.aps.org/prd/pdf/10.1103/PhysRevD.97.055039>

<https://journals.aps.org/prd/pdf/10.1103/PhysRevD.99.055043>

*Et pour un couplage à  $B-L$ , ou  $L$ , ... ?*

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\left(\frac{B}{A_r}\right)_{\text{Ti-Pt}} \simeq .00079 \\ \Delta\left(\frac{L}{A_r}\right)_{\text{Ti-Pt}} \simeq .057 \simeq 72 \Delta\left(\frac{B}{A_r}\right)_{\text{Ti-Pt}} \end{array} \right.$$

$B$  est presque proportionnel à la masse, alors que  $L$  ou  $B-L$  le sont moins

Meilleure sensibilité, pour une force agissant sur  $B-L$  ou  $L$  (plutôt que  $B$ )



**$B - L$** : n'agit que sur les neutrons

**$L$** : que sur les protons (avec leurs électrons)

Moyenne sur les nucléons  $\Rightarrow$  Remplacer  $\alpha_g$  par  $\bar{\alpha}_g = \langle \alpha_g \rangle = \alpha_g/4$

$$\lim |\bar{\alpha}_g| \simeq \begin{cases} \frac{|\lim \delta|}{|\Delta(B/A_r)|} \simeq 3.2 \times 10^{-11} & (B) \\ \frac{|\lim \delta|}{|\Delta(2L/A_r)|} \simeq 2.3 \times 10^{-13} & (L \text{ ou } B-L) \end{cases} \quad (2\sigma)$$

**Limite sur  $\bar{\alpha}_g$  pour un couplage à  $L$  ou  $B-L \approx 2.3 \times 10^{-13}$   
 $\approx$  140 fois plus contraignante que pour  $B$  !**

***Limites sur les  $\epsilon$ 's***

$$|\epsilon| < \begin{cases} 5 \times 10^{-24} & (B) \\ .9 \times 10^{-24} & (L \text{ ou } B-L) \end{cases} \quad (2\sigma)$$

pour un couplage à  $\epsilon_B B e \dots$

**Couplage plus petit que pour l'électromagnétisme par  $\approx 10^{-24}$**

*Nouvelle force  $\lesssim 10^{-12} \times$  gravitation, ou  $\lesssim 10^{-48} \times$  électromagnétisme*

**Mais pourquoi se préoccuper de couplages aussi faibles ??**

Dès les années 1970 on avait considéré des théories supersymétriques  
avec un  $U(1)$  supplémentaire, associé à une nouvelle interaction  
avec une constante de couplage  $g''$  pouvant être très petite,  $\rightarrow 0$

Des forces extrêmement faibles, avec un couplage  $g'' \lesssim 10^{-24} e$ ,  
pourraient être reliées (via la supersymétrie)  
à des échelles d'énergie extrêmement élevées

$$\approx \frac{\text{qqs TeV}}{\sqrt{g''}} \gtrsim 10^{15-16} \text{ GeV}$$

Ceci correspond à des **densités d'énergie du vide gigantesques**  
qui pourraient être à l'origine de **l'inflation très rapide de l'univers primordial**

## CONCLUSION

**MICROSCOPE** : amélioration par **un facteur  $\approx 10$**   
d'un test du principe d'équivalence, au niveau de  **$2 \times 10^{-14}$**

Très beau succès scientifique et technique

Résultats définitifs connus prochainement

Nouveaux projets à l'étude

Le principe d'équivalence demeure valable

Si nouvelle force de longue portée couplée à  **$B$** , ou  **$B-L$** , ...

$< 3.2 \times 10^{-11} \times$  gravitation, ou  $< 2.5 \times 10^{-47} \times$  électromagnétisme (pour  **$B$** )

$< 2.3 \times 10^{-13} \times$  gravitation, ou  $< .8 \times 10^{-48} \times$  électromagnétisme (pour  **$B-L$** )

(Plus spéculatif) Lien possible

interaction ext. faible  $\lesssim 10^{-12}$  **gravité**  $\longleftrightarrow$

échelle d'énergie très élevée  $\gtrsim 10^{15-16}$  **GeV** (grande unification, inflation ... ?)

Raison supplémentaire de rechercher de très petites violations du PE,  $\lesssim 10^{-14}$