

Le kilogramme et la redéfinition des unités du SI Status et perspectives

Franck Pereira Dos Santos

LNE-SYRTE

Séminaire GRECO – 13 février 2011

Plan de l'exposé

- Unités SI et statut du Kilogramme
- Vers une redéfinition ?
- La balance du watt du LNE
- Participation du SYRTE : Gravimétrie

Plan de l'exposé

- Unités SI et statut du Kilogramme
- Vers une redéfinition ?
- La balance du watt du LNE
- Participation du SYRTE : Gravimétrie

Systeme d'unités

- Systeme métrique né sous la Révolution
 - ⇒ Universalité
 - Systeme accessible à tous
(dimension Terre, propriétés de l'eau ...)
- Fin du 19e : Johnstone-Stoney et Planck
 - Fonder le système sur constantes fondamentales issues de la physique théorique
- Pb : concilier idéal théoricien et la mise en pratique
 - ⇒ Réforme du SI possible grâce aux développements récents

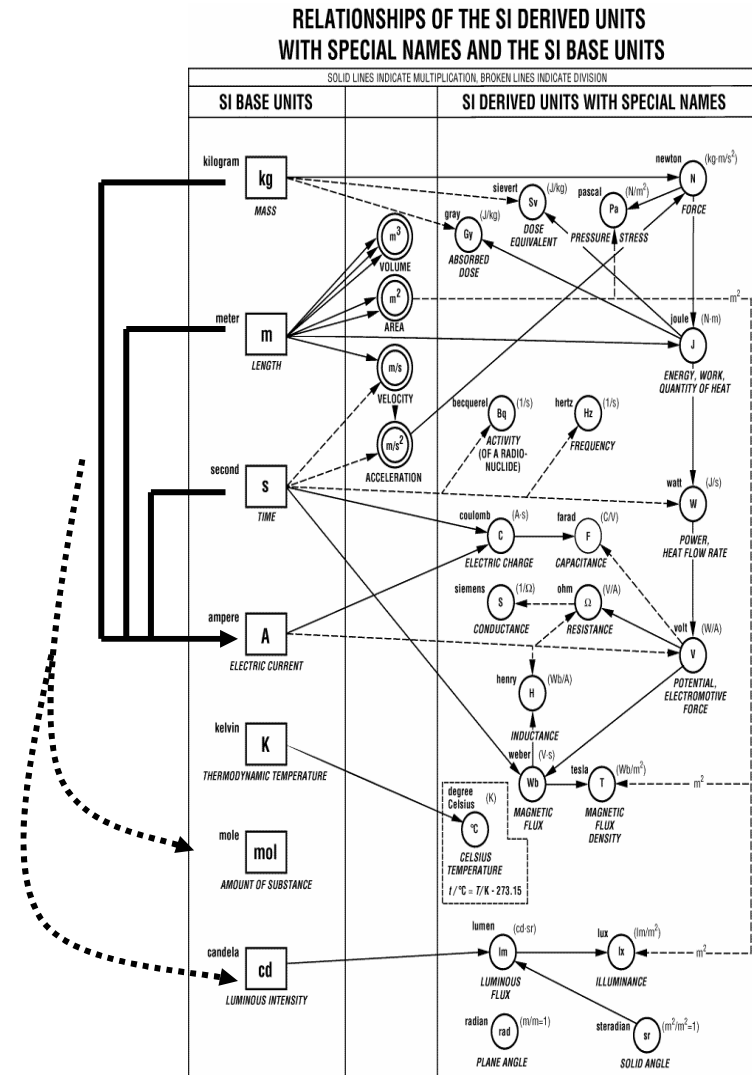
Le Système International d'unités

7 unités de base

- **seconde** (transition 133Cs)
- **mètre** (seconde + c)
- **kilogramme** (étalon K)
- **ampère**
- **kelvin** (point triple de l'eau)
- **candela** (flux énergétique)
- **mole** (qté de matière, m_C)

Ensemble de définitions
disparates, héritées du passé

Manque de cohérence



Le mètre : un cas d'école

Définition à partir d'une constante fondamentale

c : constante de conversion, relie temps-espace

Définition rendue possible grâce à l'optique moderne :

- Mesure de longueurs par interférométrie

1960 radiation lampe Krypton

- Lasers stabilisés + mesure de fréquences optiques

Mesure de c très précises

⇒ 1983 : c est fixée, le mètre est rattaché à la s

Différents types de constantes

- **Constantes de conversions**

relient deux grandeurs physiques *a priori* différentes

Ex : c, h, kb

Constantes dimensionnées

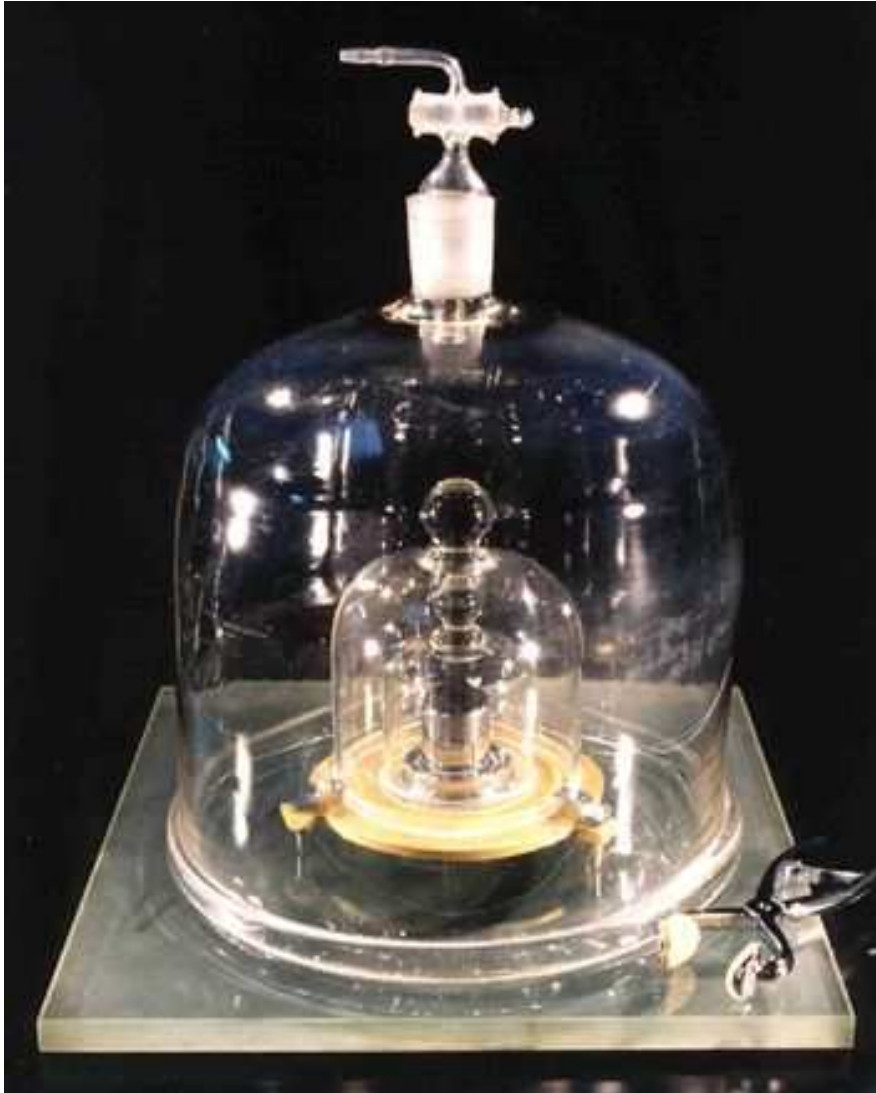
- **Rapports sans dimension**

Ex : constantes de couplage

α constante de structure fine

\Rightarrow Valeurs indépendantes du système d'unités

Le kilogramme



“Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.”

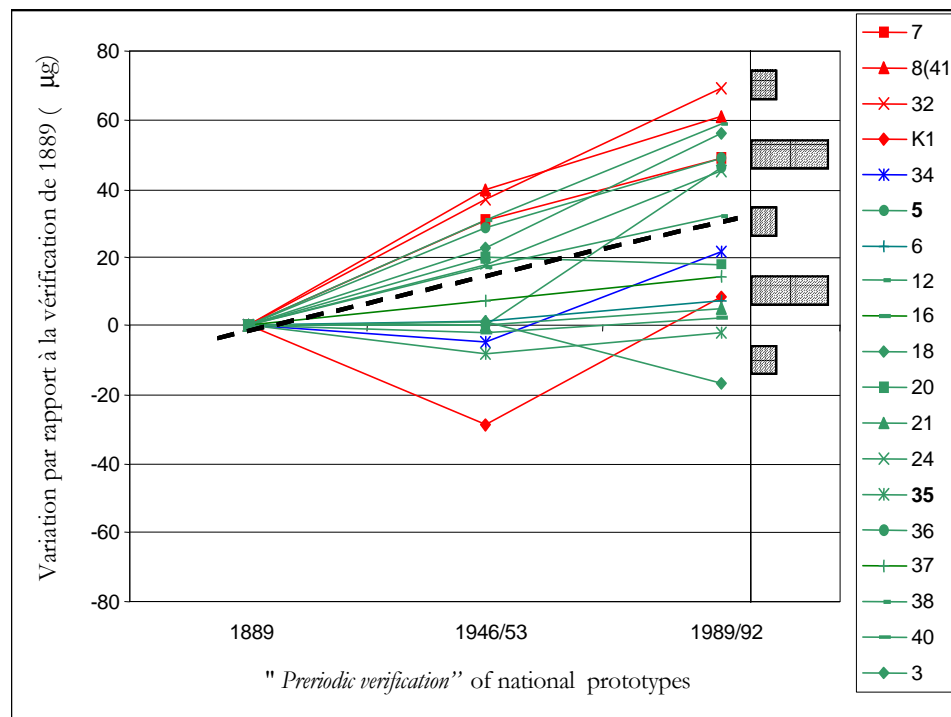
Définition de 1889

Artefact matériel

Cylindre platine irridié
(90 % platine et 10 % iridium)
conservé au BIPM

Comparaisons et dérive

No.	Description	1889	1946/53	1989/92
K1	Copie officielle (BIPM)	0	-29	8
7	Copie officielle (BIPM)	0	31	49
8(41)	Copie officielle (BIPM)	0	40	61
32	Copie officielle (BIPM)	0	37	69
34	Acad. Sci. Paris	0	-5	22
5	Prototype (Italie)	0	0	46
6	Prototype (Japon)	0	1	7
12	Prototype (Féd. de Russie)	0	17	32
18	Prototype (Royaume Uni)	0	1	-17
20	Prototype (Etats Unis)	0	20	18
21	Prototype (Mexique)	0	0	5
24	Prototype (Espagne)	0	18	45
35	Prototype (France)	0	-8	-2
36	Prototype (Norvège)	0	29	49
37	Prototype (Belgique)	0	7	14
38	Prototype (Suisse)	0	31	59
40	Prototype (Suède)	0	-2	2
3	Prototype (Espagne)	0	23	56



Evolution des masses de témoins et prototypes nationaux par rapport au prototype international

Dérive !!
de l'ordre de 25 µg sur 100 ans

Plan de l'exposé

- Unités SI et statut du Kilogramme
- Vers une redéfinition ?
- La balance(s) du Watt du LNE
- Participation du SYRTE : Gravimétrie

Qui décide?

- La **Convention du Mètre** est le traité qui a créé en 1875 le **Bureau international des poids et mesures (BIPM)**, une organisation intergouvernementale sous l'autorité de la **Conférence générale des poids et mesures (CGPM)** et la supervision du **Comité international des poids et mesures (CIPM)**.
- La Conférence générale entend le rapport du **Comité international des poids et mesures (CIPM)** sur les travaux accomplis ; elle discute et examine les dispositions à prendre pour assurer l'extension et l'amélioration du **Système international d'unités (SI)** ; elle sanctionne les résultats de nouvelles déterminations métrologiques fondamentales ; elle prend des résolutions scientifiques de portée internationale dans le domaine de la métrologie...

- Le Comité international des poids et mesures (CIPM) est constitué de dix-huit représentants de pays membres de la Convention du mètre. Sa principale mission consiste à promouvoir l'uniformisation mondiale des unités de mesure. Il assure cette mission par des interventions directes auprès des gouvernements ou en soumettant des propositions auprès de la CGPM.
- La mission des **Comités consultatifs (CC)** est d'étudier les progrès de la physique ayant une influence directe sur la métrologie, de préparer les recommandations soumises au CIPM, d'identifier, d'organiser et d'effectuer les comparaisons clés des étalons nationaux de mesure, et de conseiller le CIPM sur le travail de laboratoire du BIPM.
 - Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations (CCAUV)
 - **Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM)**
 - Comité consultatif des longueurs (CCL)
 - **Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM)**
 - Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR)
 - **Comité consultatif pour la quantité de matière (CCQM)**
 - Comité consultatif des rayonnements ionisants (CCRI)
 - Comité consultatif de thermométrie (CCT)
 - Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF)
 - **Comité consultatif des unités (CCU)**

Résolutions de la CGPM

Résolution 7 (1999)

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,...

... **recommande** que les laboratoires nationaux poursuivent leurs efforts pour affiner les expériences qui relient l'unité de masse à des constantes fondamentales ou atomiques et qui pourraient, dans l'avenir, servir de base à une nouvelle définition du kilogramme.

Résolution 12 (2007)

La 23^e Conférence générale des poids et mesures,...

... **recommande** que les laboratoires nationaux de métrologie et le BIPM

- poursuivent les expériences appropriées afin que le Comité international puisse juger s'il est possible ou non de redéfinir le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole en utilisant des valeurs fixées pour certaines constantes fondamentales lors de la 24^e Conférence générale en 2011,...

- ...

- et **demande** au Comité international de présenter un rapport à ce sujet à la 24^e Conférence générale en 2011 et d'entreprendre tous les préparatifs qu'il considère comme nécessaires de manière à ce que, si les résultats des expériences sont jugés convenables et les besoins des utilisateurs satisfaits, il puisse être officiellement proposé à la 24^e Conférence générale d'approuver de nouvelles définitions du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole.

Alternative ?

Masse d'une particule microscopique?

Problème raccordement micro/macrosopique

Réalisation objet massif de nombre d'atomes connu

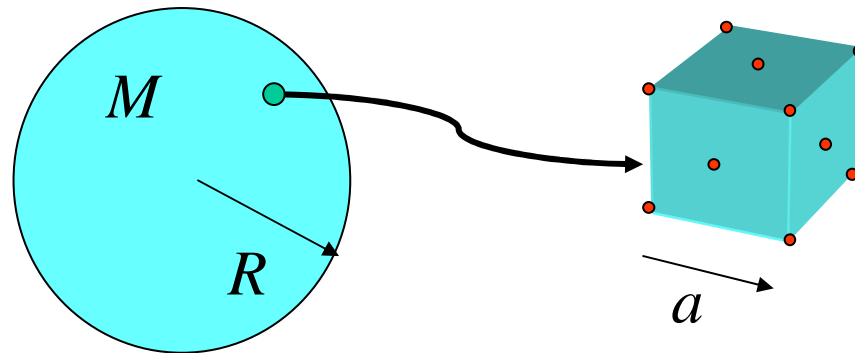
=> **Réalisation de N_A qui définit la mole**

N_A nombre arbitraire :

nombre d'atomes dans 0.012 kg de carbone 12

Le projet Avogadro

- Déterminer le nombre d'atomes dans une sphère de silicium de 1 kg



$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{n \cdot m_{Si}}{a^3 \cdot N_A}$$

Détermination de N_A

Consortium de laboratoires nationaux (coordination PTB):



INRIM (d_{110})



NMIJ (Volume)



PTB/VITCON (Densité, matériau)



NIST (d_{110})



NMIA (Production de sphères)



NPL (Surface Si)



BIPM (Masse)



EU/IRMM (Masse molaire)



CTIhpSISTC (Enrichissement)



IKZ (Croissance)



Autre Alternative ?

Relier unité de masse et unité de temps

Energie interne d'un objet de masse m : $E=mc^2$

De Broglie : cette énergie est associée au temps propre τ

=> phase de l'oscillation interne $mc^2 \tau/h$

mc^2/h est une fréquence, la fréquence de de Broglie-Compton

Fréquence mesurable au niveau microscopique

par interférométrie atomique, au niveau de 10^{-9}

Multiplication par N_A , $\nu_{\text{DBC}} = m_K c^2/h = 1000 N_A m_u c^2/h$

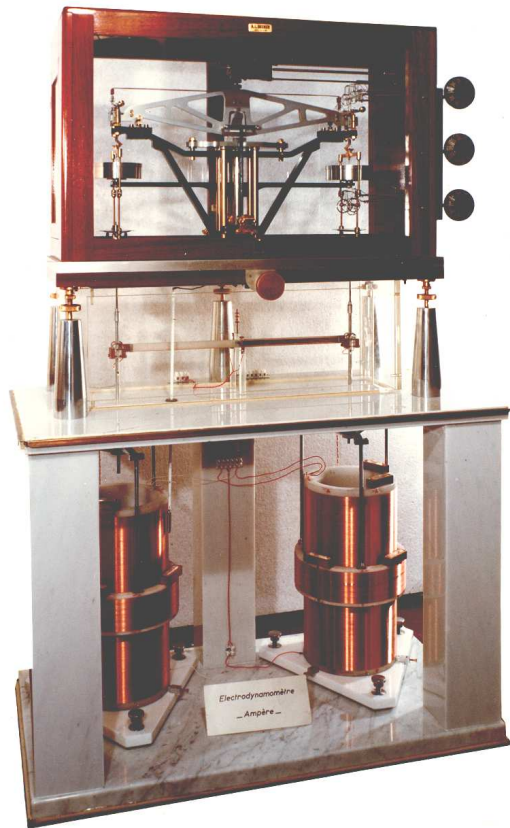
Fixer cette fréquence = fixer h :

Recommandation Académie des Sciences au CIPM en 2005

Mesure directe de cette fréquence : Métrologie électrique - BW

L'ampère

“un ampère est l'intensité d'un courant constant qui, s'il est maintenu dans deux conducteurs linéaires et parallèles, de longueurs infinies, de sections négligeables, et distants d'un mètre dans le vide, produirait entre ces deux conducteurs, une force égale à 2×10^{-7} newton par mètre linéaire .”



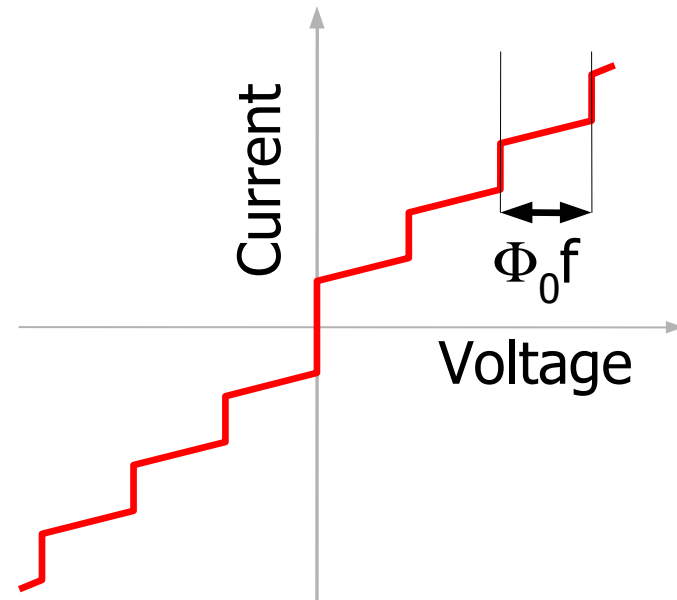
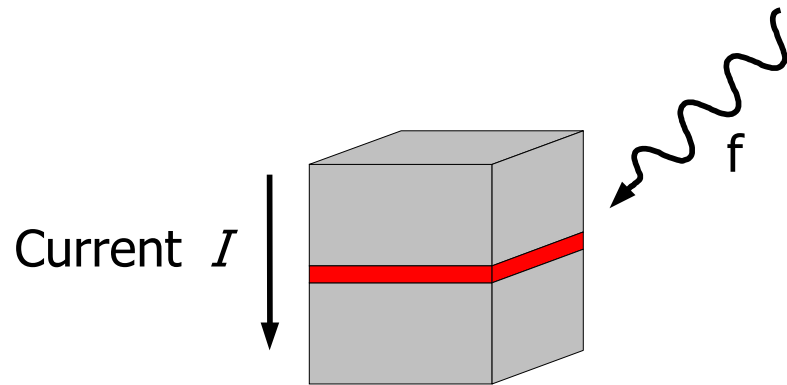
Définition à partir de μ_0 (1948)

c , $Z = \mu_0 c$: propriétés propagation ondes em fixées

Mise en pratique difficile
Incertitude relative: qq 10^{-5}

Méetrologie électrique quantique: l'effet Josephson

Jonction Josephson : isolant entre deux plaques supra



Paliers de tension reliés à f :

$$V = \Phi_0 f = nf / K_J$$

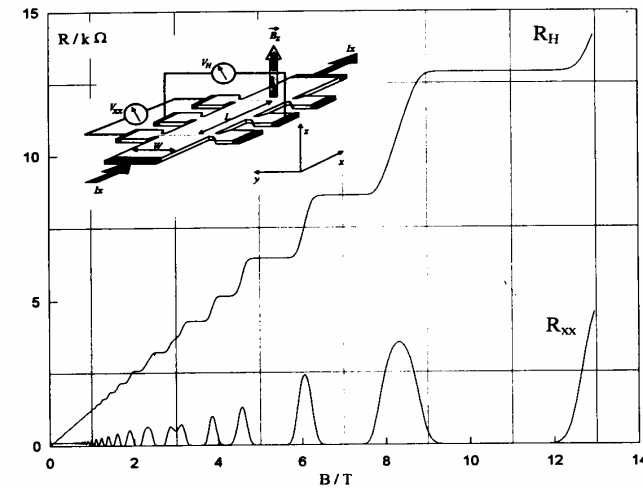
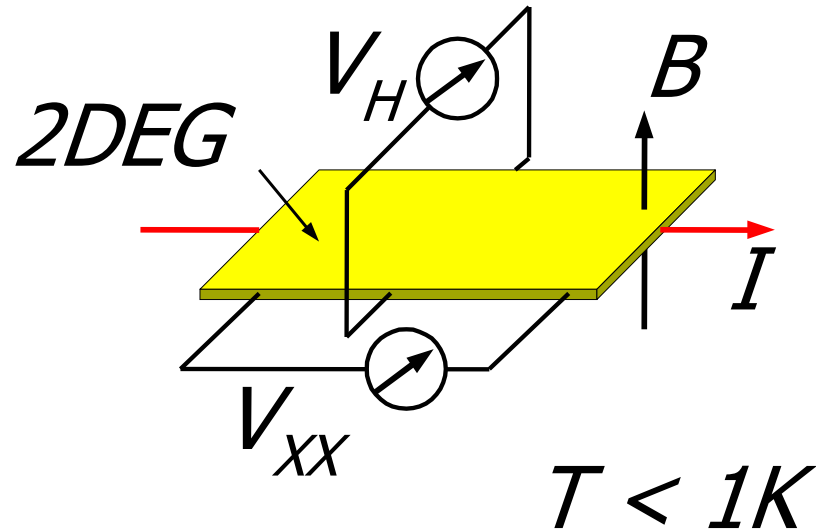
$$K_J = 2e/h$$

$$K_{J-90} = 483\,597,9 \text{ GHz/V}$$



Méetrologie électrique quantique: l'effet Hall quantique

Gaz bidimensionnel d'é dans semiconducteur

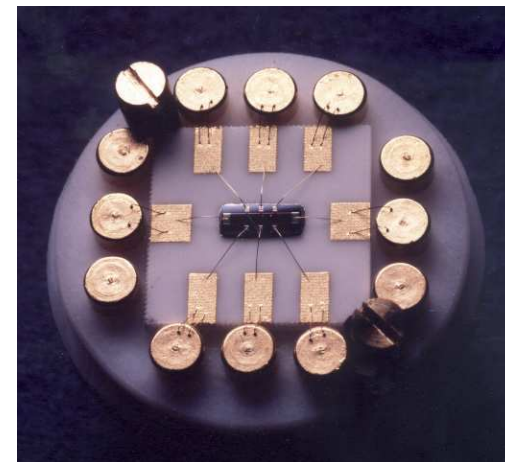


Résistance transverse : paliers

$$R = R_K / i$$

$$R_K = h / e^2$$

$$R_{K-90} = 25812,807 \Omega (\pm 1.10^{-7})$$



Métrologie électrique quantique

Reproductibilités EJ et EHQ : 10^{-10} et 10^{-9}

⇒ Mesures électriques sans raccordement à l'ampère SI

Si on fixe h , tentation de fixer e , pour fixer R_k et K_j

Mais !!

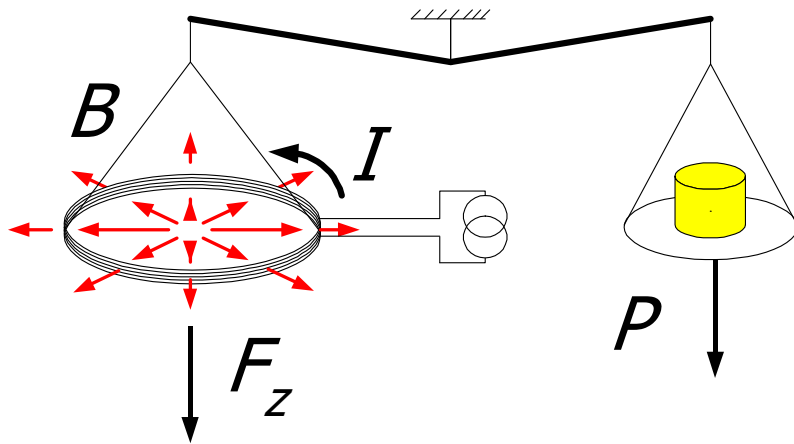
Validation du lien R_k , K_j et h , e au niveau de qq 10^{-7} - 10^{-8}

Comparaison $Z_0 / R_k = 2\alpha$,
avec Z_0 réalisée à l'aide d'un condensateur calculable

Triangle Métrologique : Réalisation Quantique loi d'Ohm

La balance du watt : principe

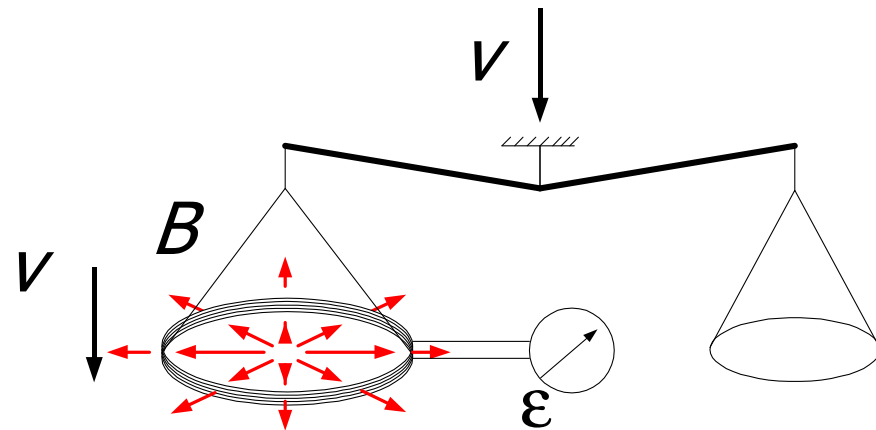
Phase statique



$$F_z = mg = Bli$$

$$F_z v = -\varepsilon i$$

Phase dynamique



$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -Bl \frac{dz}{dt} = -Blv$$

$$mgv = \frac{\varepsilon V}{R}$$

La balance du watt : principe

$$\text{Effet Josephson} \quad \rightarrow \quad \varepsilon = n_1 f_1 / K_J \quad V = n_2 f_2 / K_J$$

$$\text{Effet Hall Quantique} \rightarrow R = k R_K / i$$

$$mgv = \frac{A}{K_J^2 R_K}$$

$$A = \frac{n_1 f_1 n_2 f_2 i}{k}$$

$$K_J = 2e/h \text{ and } R_K = h/e^2$$

$$\frac{h}{m} = \frac{4gv}{A}$$

Organismes impliqués dans des projets BW

1975 : Proposition B. Kibble (NPL)

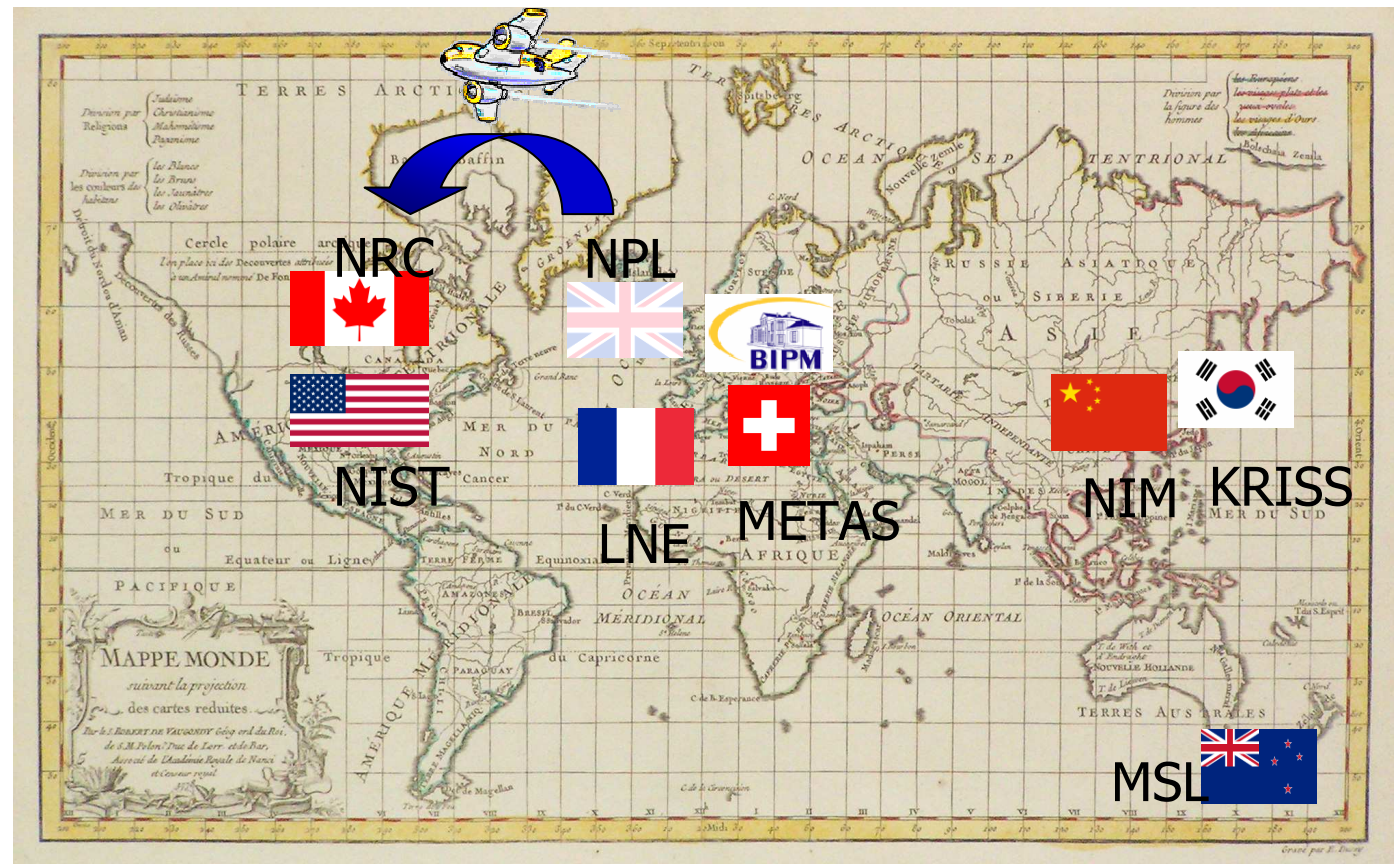
1977 : BW NPL **arrêtée, vendue au NRC**

1980 : BW NIST

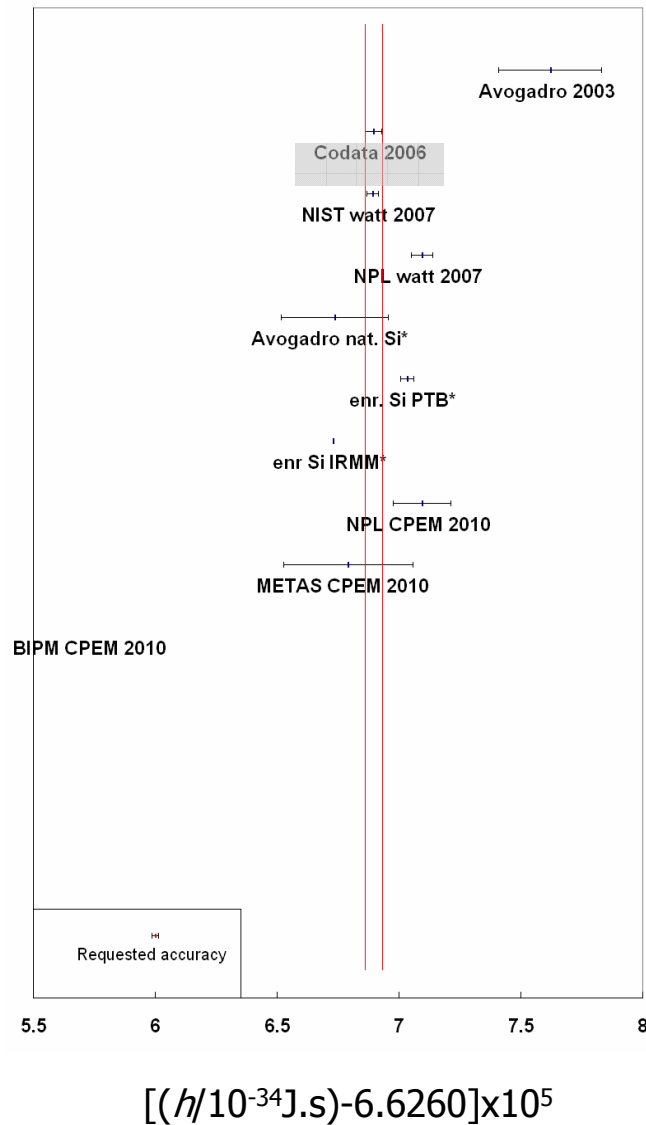
1997 : METAS

2002 : LNE

2007 : BIPM, NIM



Valeurs de h



2007 : pas d'accord entre les BW NIST et NPL

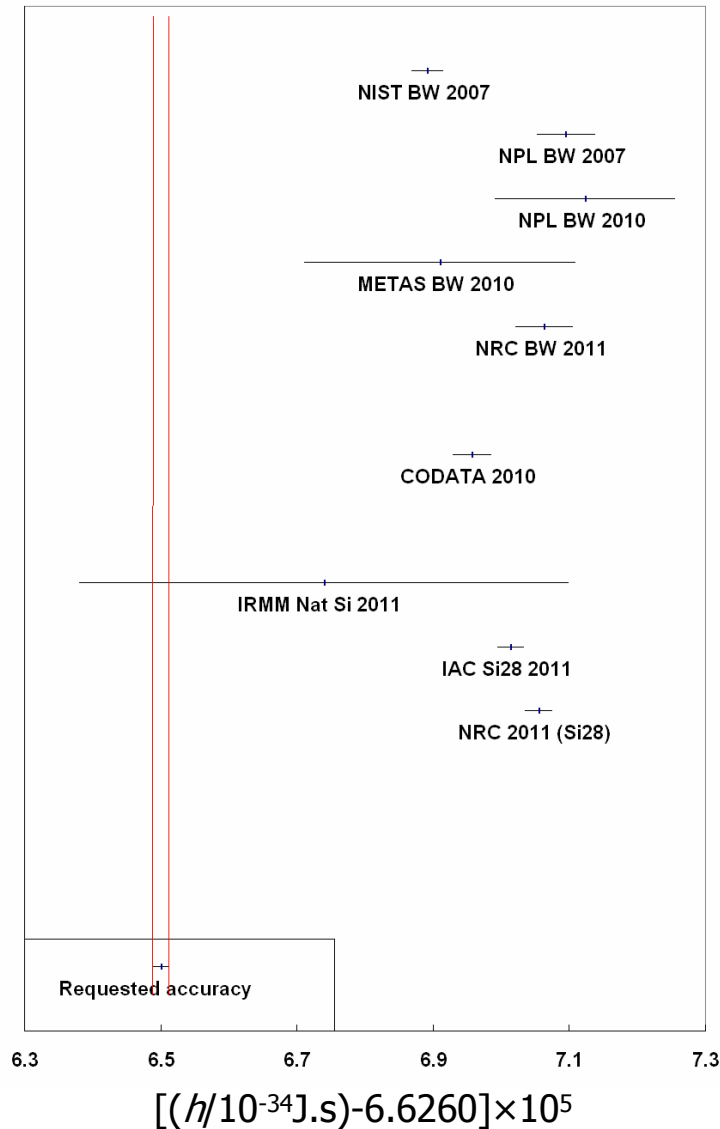
2007 : ni d'accord entre BW et N_A (2003)

Lien N_A et h : spectroscopie H
 \Rightarrow constante de Rydberg

$$h \cdot N_A = \frac{c M_p \alpha^2}{2 \cdot R_\infty \left(\frac{m_p}{m_e} \right)}$$

2008-2009 : Réévaluation N_A : l'écart se réduit
 Fin 2009 : nouvelles mesures N_A ^{28}Si

Valeurs de h publiées et non publiées



Situation actuelle :

BW (NIST) et Avogadro (IAC) :
Incertitudes déclarées : 3×10^{-8}

Différence de $17(5) \times 10^{-8}$!!!!

Résolutions de la CGPM 2011

Résolution A

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 24^e réunion,

considérant

.....

que de nombreux progrès ont été effectués ces dernières années pour relier la masse du prototype international à la constante de Planck h , par des méthodes telles que les expériences de la balance du watt ou les mesures de la masse d'un atome de silicium,

.....

- que, bien que des progrès notables aient été réalisés, tous les objectifs fixés par la Résolution 12 adoptée par la CGPM à sa 23^e réunion n'ont pas été atteints, ce qui ne permet pas au CIPM de soumettre une proposition finalisée,

prend acte de l'intention du Comité international des poids et mesures de proposer une révision du SI qui se présenterait de la manière suivante :

- le Système international d'unités, le SI, sera le système d'unités selon lequel :
 - la fréquence de la transition hyperfine dans l'état fondamental de l'atome de césium $133 \Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$ est égale à exactement 9 192 631 770 hertz,
 - la vitesse de la lumière dans le vide c est égale à exactement 299 792 458 mètres par seconde,
 - la constante de Planck h est égale à exactement $6,626\ 06 \times 10^{-34}$ joule par seconde,
 - la charge élémentaire e est égale à exactement $1,602\ 17 \times 10^{-19}$ coulomb,
 - la constante de Boltzmann k est égale à exactement $1,380\ 6 \times 10^{-23}$ joule par kelvin,
 - la constante d'Avogadro N_A est égale à exactement $6,022\ 14 \times 10^{23}$ par mole,
 - l'efficacité lumineuse K_{cd} d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz est égale à exactement 683 lumens par watt,

- le kilogramme restera l'unité de masse mais son amplitude sera déterminée en fixant la valeur numérique de la constante de Planck à exactement $6,626\ 06X \times 10^{-34}$ lorsqu'elle sera exprimée en $\text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$, unité du SI égale au joule par seconde, J s,
- l'ampère restera l'unité de courant électrique mais son amplitude sera déterminée en fixant la valeur numérique de la charge élémentaire à exactement $1,602\ 17X \times 10^{-19}$ lorsqu'elle sera exprimée en s A, unité du SI égale au coulomb, C,
- le kelvin restera l'unité de température thermodynamique mais son amplitude sera déterminée en fixant la valeur numérique de la constante de Boltzmann à exactement $1,380\ 6X \times 10^{-23}$ lorsqu'elle sera exprimée en $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$, unité du SI égale au joule par kelvin, J K⁻¹,
- la mole restera l'unité de quantité de matière d'une entité élémentaire spécifique, c'est-à-dire un atome, une molécule, un ion, un électron, ou toute autre particule ou groupe particulier de telles particules, mais son amplitude sera déterminée en fixant la valeur numérique de la constante d'Avogadro à exactement $6,022\ 14X \times 10^{23}$ lorsqu'elle sera exprimée en unité du SI mol⁻¹.

La Conférence générale des poids et mesures,

note également

- que les nouvelles définitions du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole seront rédigées en utilisant une formulation dite « à constante explicite », c'est-à-dire une définition dans laquelle l'unité est définie indirectement en donnant explicitement une valeur exacte à une constante fondamentale reconnue,
- que la définition actuelle du mètre est liée à une valeur exacte de la vitesse de la lumière dans le vide, qui est également une constante fondamentale reconnue,
- que la définition actuelle de la seconde est liée à une valeur exacte caractérisant une propriété bien définie de l'atome de césium, qui constitue également une constante de la nature,
- que la définition existante de la candela n'est pas liée à une constante fondamentale mais qu'elle peut être considérée comme étant liée à une valeur exacte d'une constante de la nature,

- que l'intelligibilité du Système international d'unités serait renforcée si toutes ses unités de base étaient définies en utilisant la même formulation,

c'est pourquoi le Comité international des poids et mesures proposera également

de reformuler les définitions actuelles de la seconde, du mètre et de la candela selon une forme complètement équivalente qui pourrait être la suivante :

- la seconde, symbole s, est l'unité de temps ; son amplitude est déterminée en fixant la valeur numérique de la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 au repos, à une température de 0 K, à exactement 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en s^{-1} , unité du SI égale au hertz, Hz,
- le mètre, symbole m, est l'unité de longueur ; son amplitude est déterminée en fixant la valeur numérique de la vitesse de la lumière dans le vide à exactement 299 792 458 lorsqu'elle est exprimée en unité du SI $m s^{-1}$,
- la candela, symbole cd, est l'unité d'intensité lumineuse dans une direction donnée ; son amplitude est déterminée en fixant la valeur numérique de l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique d'une fréquence de 540×10^{12} Hz à exactement 683 lorsqu'elle est exprimée en $m^{-2} kg^{-1} s^3 cd sr$ ou en $cd sr W^{-1}$, unité du SI égale au lumen par watt, $lm W^{-1}$.

Il sera ainsi manifeste que les définitions des sept unités de base du SI découlent naturellement des sept constantes précédemment indiquées.

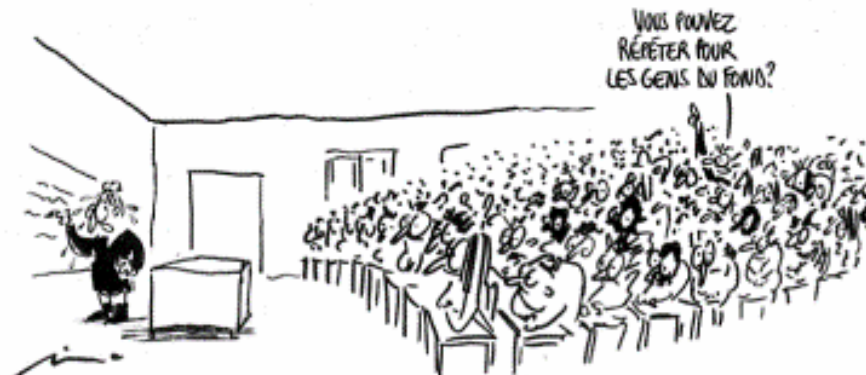
Comment formuler (autrement) la définition?

$$E = mc^2 \qquad E = h\nu$$



$$m = \frac{h}{c^2} \nu$$

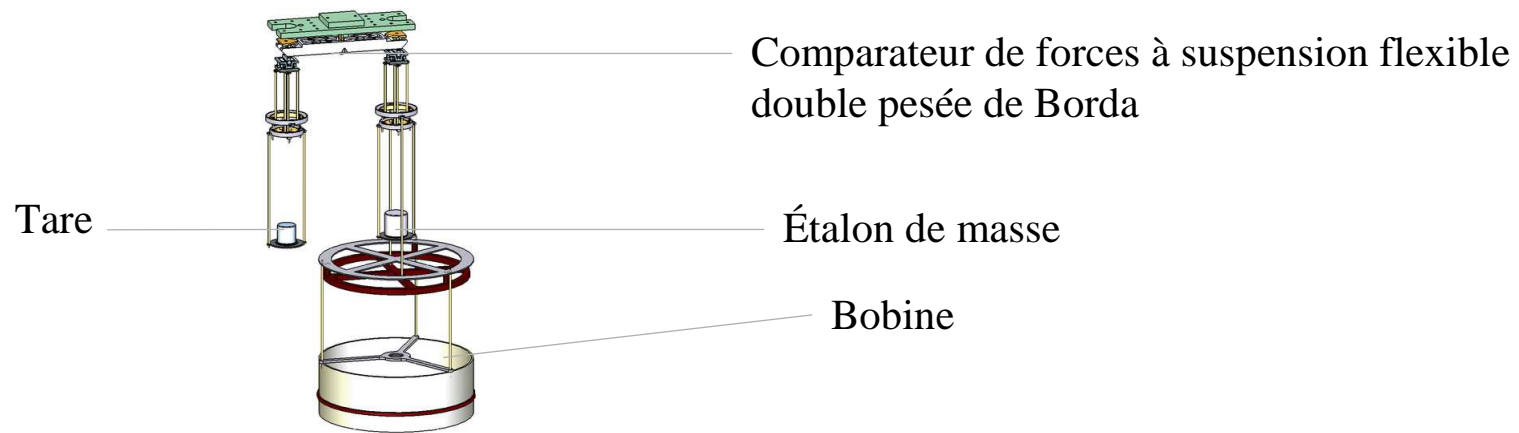
The kilogram is the mass of a body whose equivalent energy is equal to that of a number of photons whose frequencies sum to exactly $(299792458^2/66260693) \times 10^{41}$ hertz.



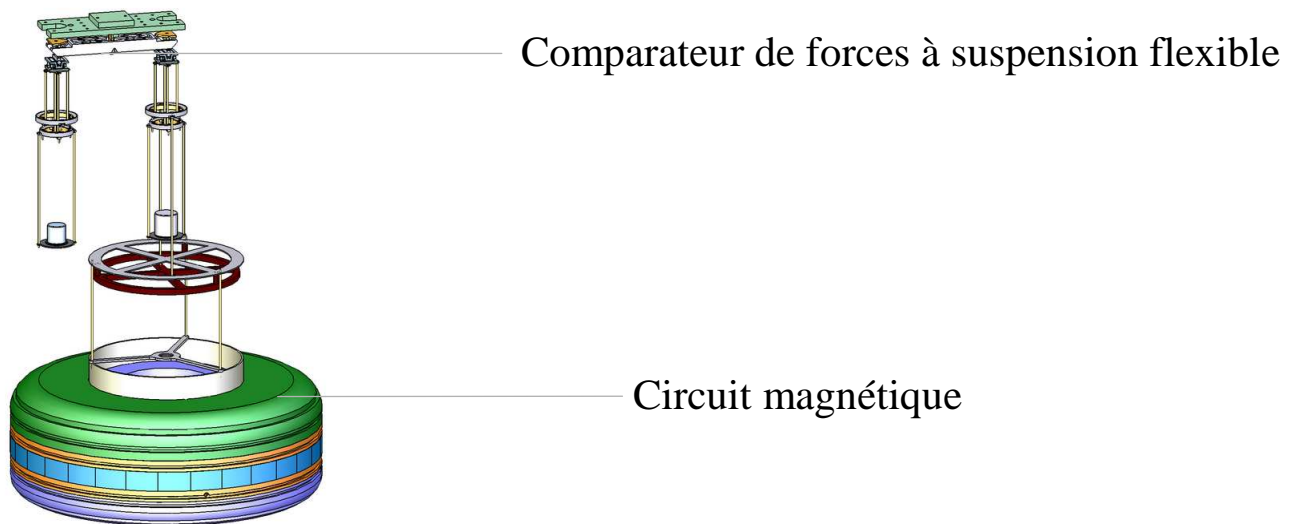
Plan de l'exposé

- Unités SI et statut du Kilogramme
- Vers une redéfinition ?
- **La balance du watt du LNE**
- Participation du SYRTE : Gravimétrie

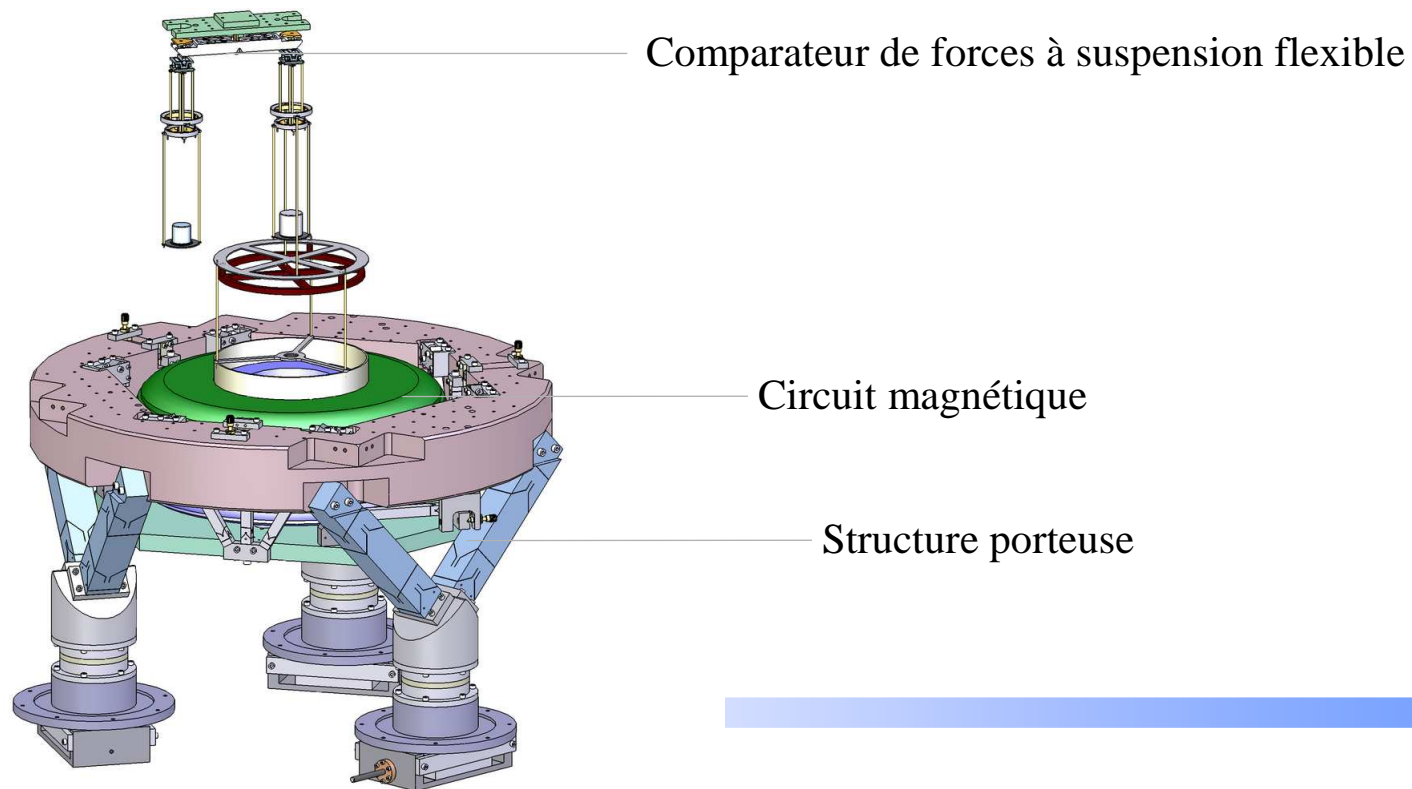
L'expérience française de « balance du watt »



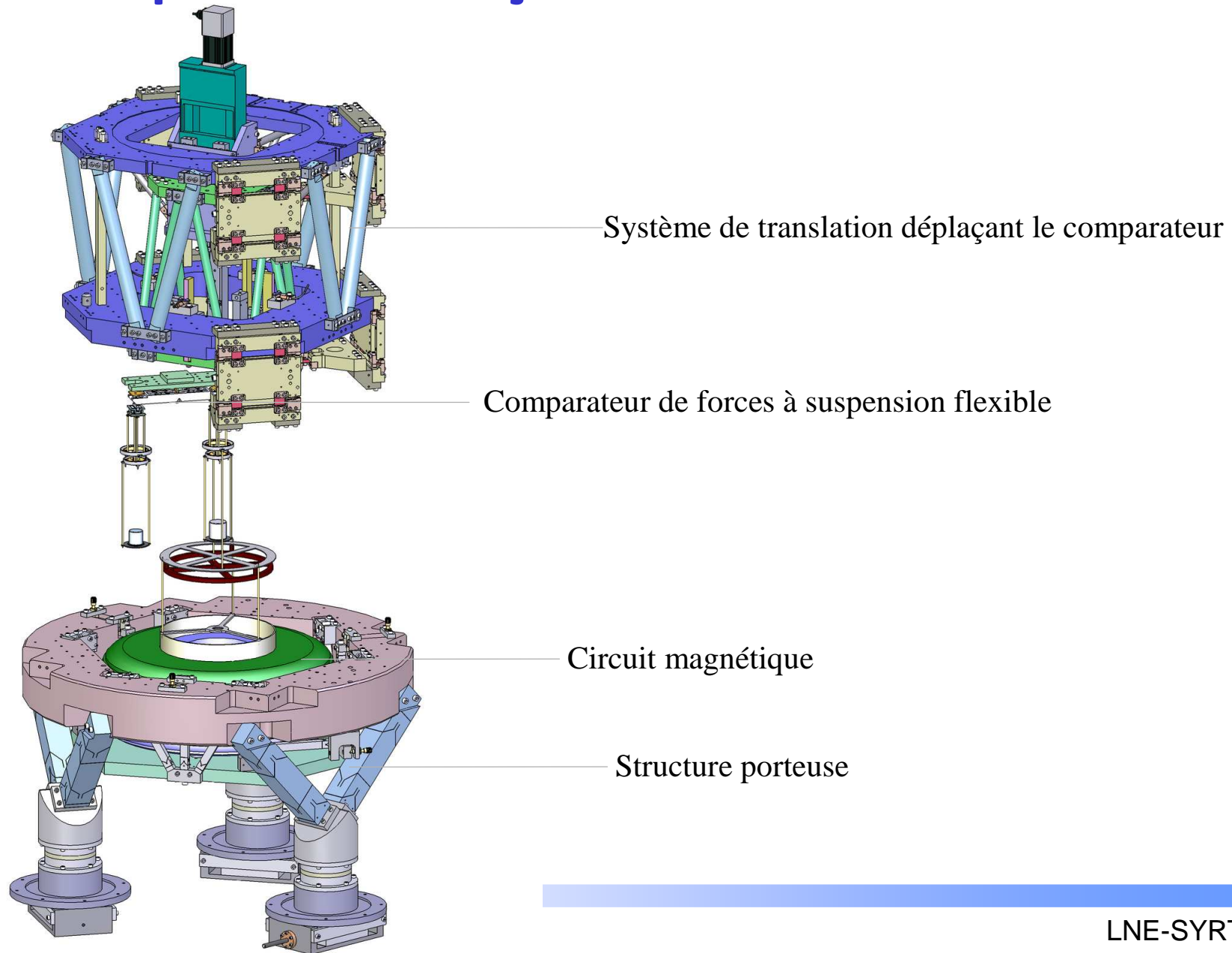
L'expérience française de « balance du watt »



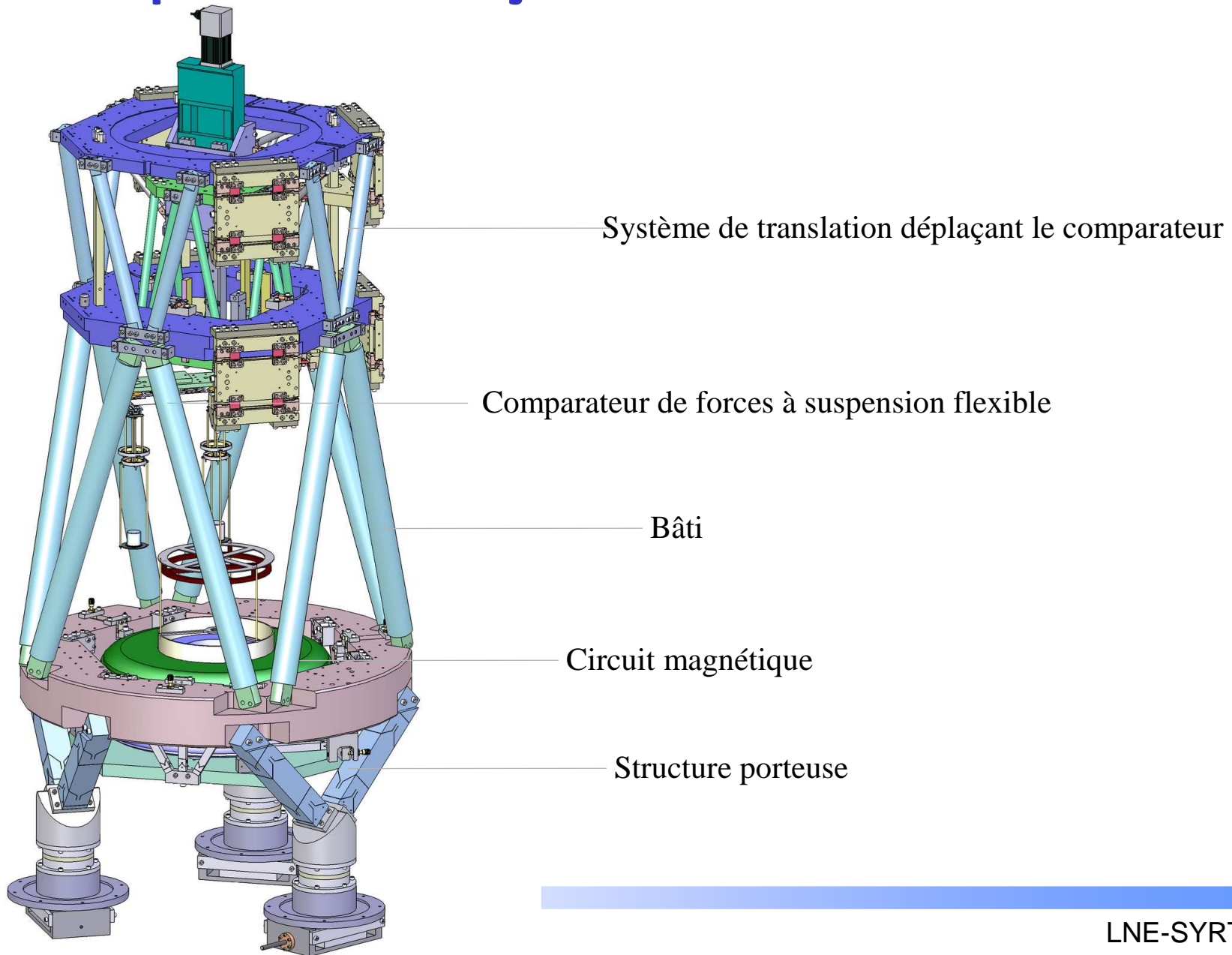
L'expérience française de « balance du watt »



L'expérience française de « balance du watt »



L'expérience française de « balance du watt »

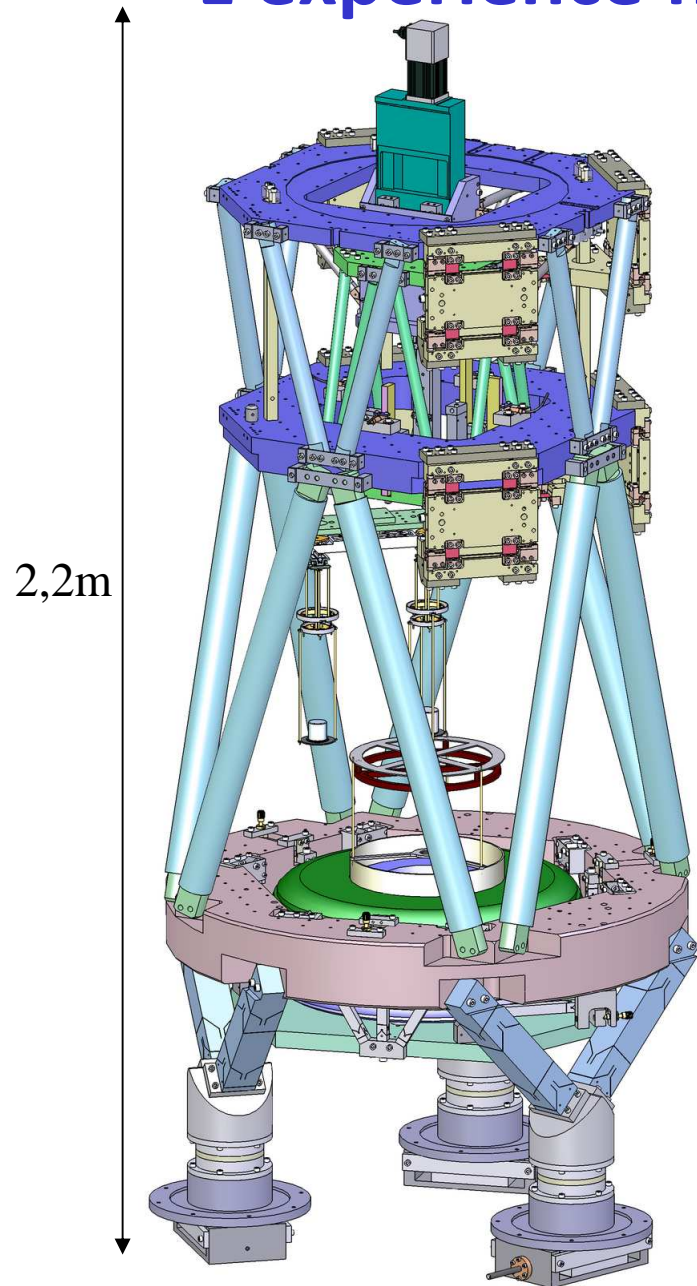


L'expérience française de « balance du watt »



2,2m

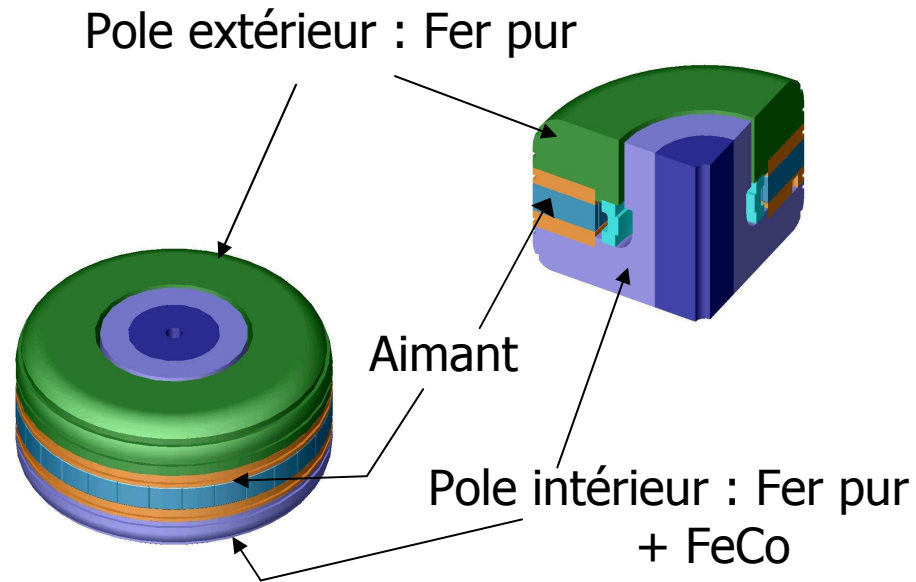
L'expérience française de « balance du watt »



Choix des paramètres de l'expérience

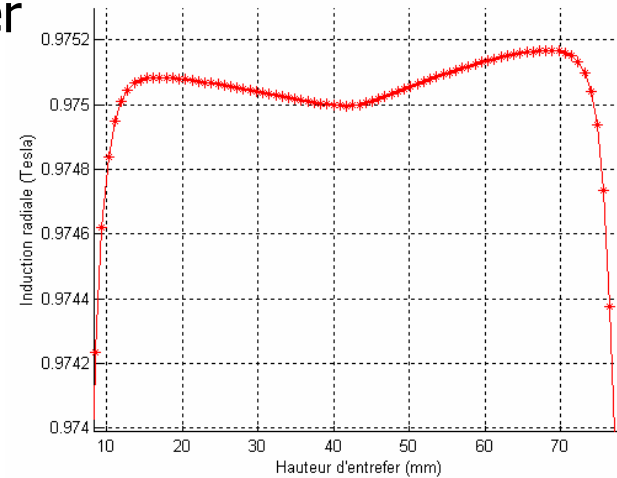
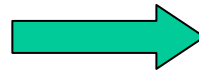
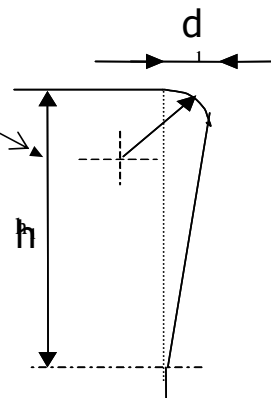
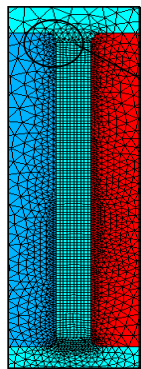
Géométrie du circuit magnétique	Axisymétrique
Intensité du champ d'induction	1 T
Longueur de la bobine	500 m
Diamètre moyen bobine	266 mm
Intensité du courant	5 mA
Force de Laplace	2,5 N
Étalon de masse	500 g
Masse de la tare	250 g
Résistance étalon	200 Ω
Course de la bobine	80 mm dont 40 mm utiles
Vitesse de déplacement	2 mm/s
Tension induite	1 V

Circuit Magnétique



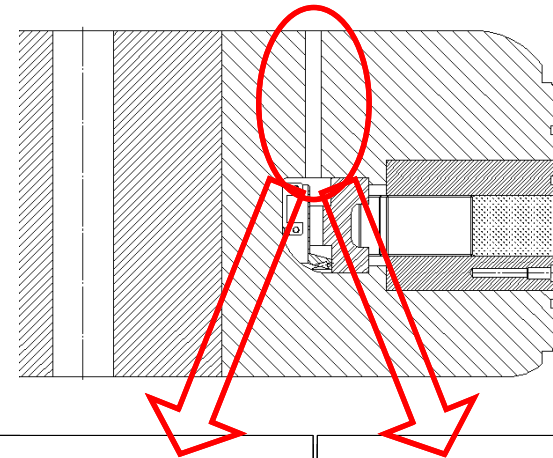
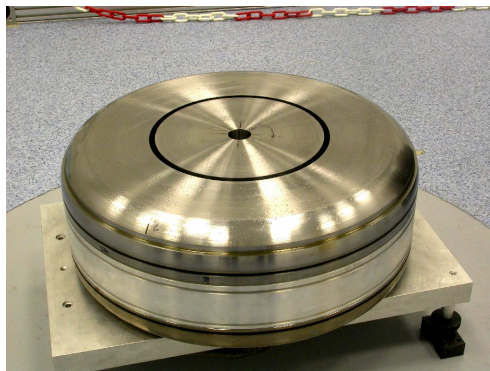
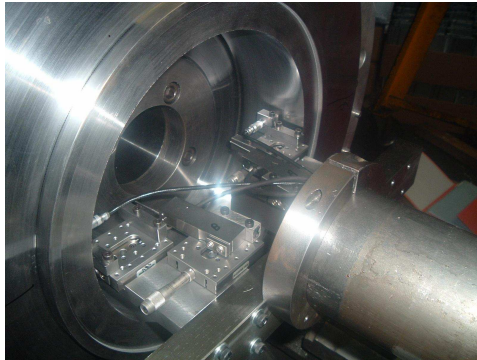
- ✓ Entrefer: $\Phi=266$ mm, $e=9$ mm
- ✓ Induction Radiale : 1 T
- ✓ Aimants $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$
- ✓ Matériaux doux: Fe, FeCo, XC48

Influence du profil de l'entrefer



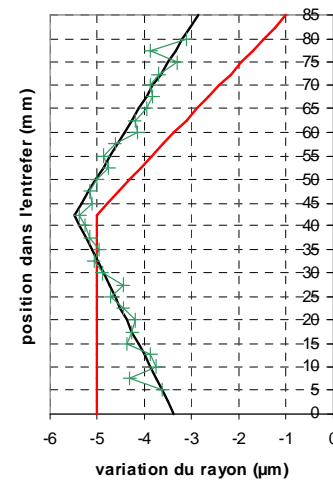
Modélisation aux éléments finis:

- ✓ Forces magnétiques
- ✓ Magnétostriction
- ✓ Forces de serrage



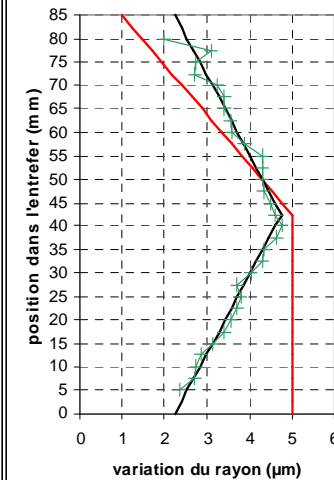
Variation du rayon de la face intérieure de l'entrefeer

— profil nominal attendu après montage
— Profil à usiner d'après modélisation
— Profil usiné

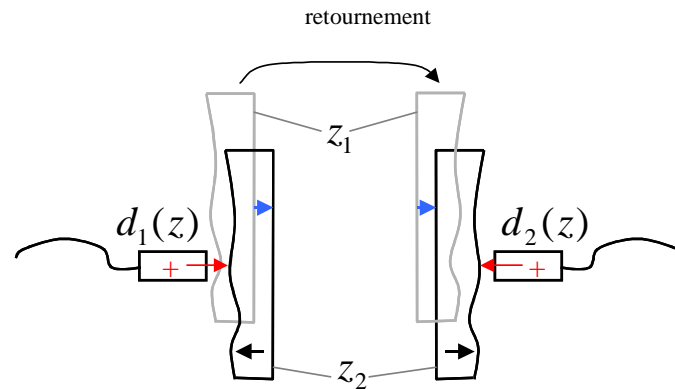
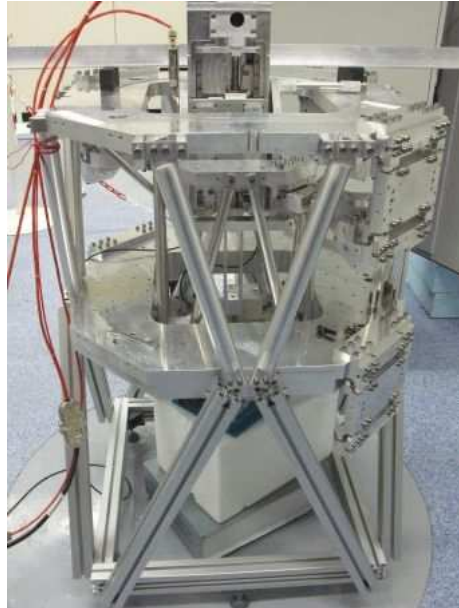


Variation du rayon de la face extérieure de l'entrefeer

— profil nominal attendu après montage
— Profil à usiner d'après modélisation
— Profil usiné



Rectitude du dispositif de guidage

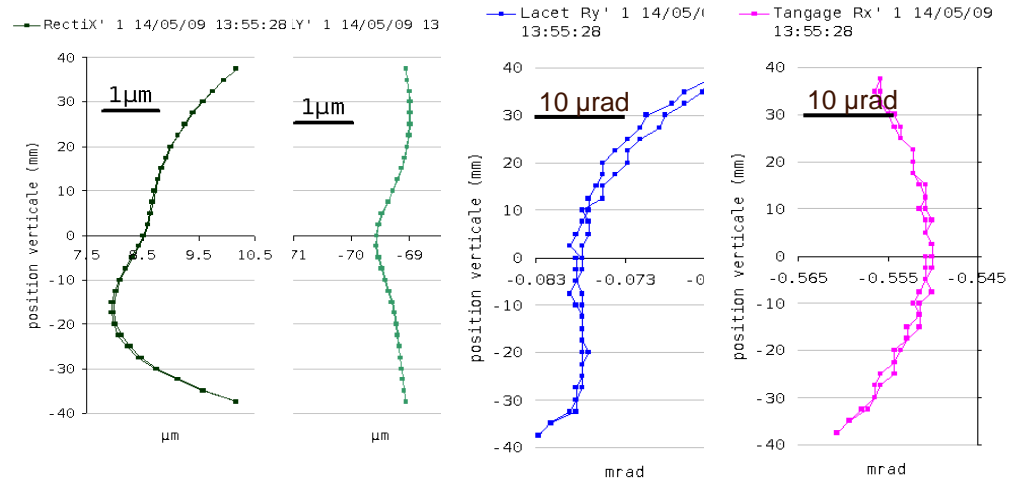


$$d_1(z) \rightarrow = \rightarrow + \leftarrow$$

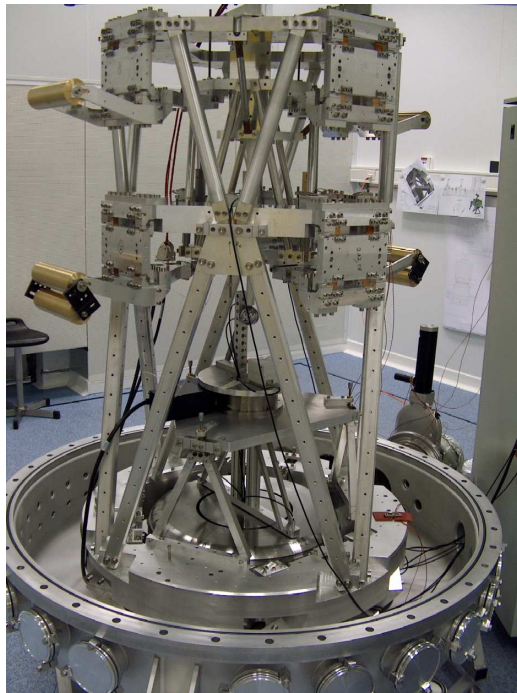
$$d_2(z) \rightarrow = \leftarrow + \leftarrow$$

$$d_1(z) + d_2(z) = 2 \times \leftarrow : \text{gauge}$$

$$d_1(z) - d_2(z) = 2 \times \rightarrow : \text{movement}$$

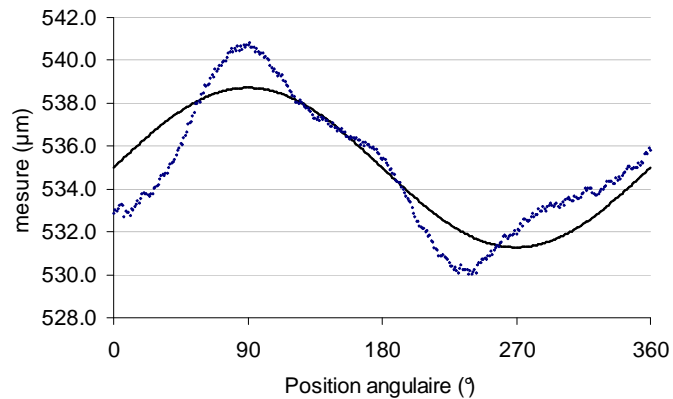
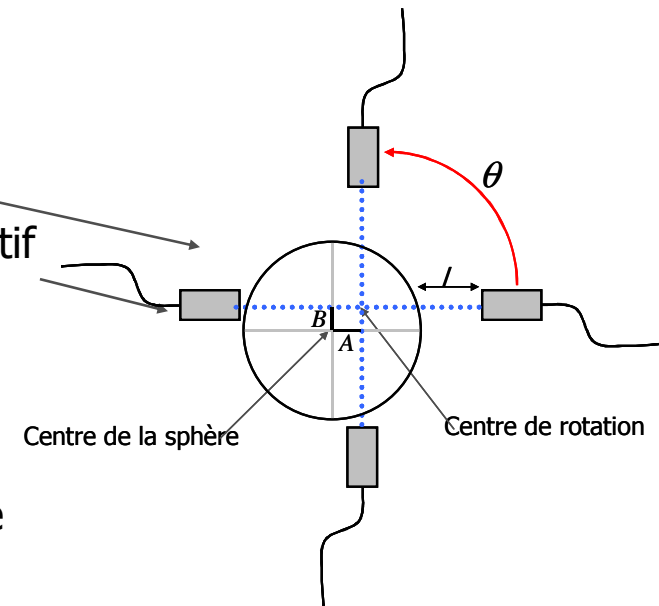


Ajustement de la verticalité de la trajectoire



sphère
Capteur capacitif

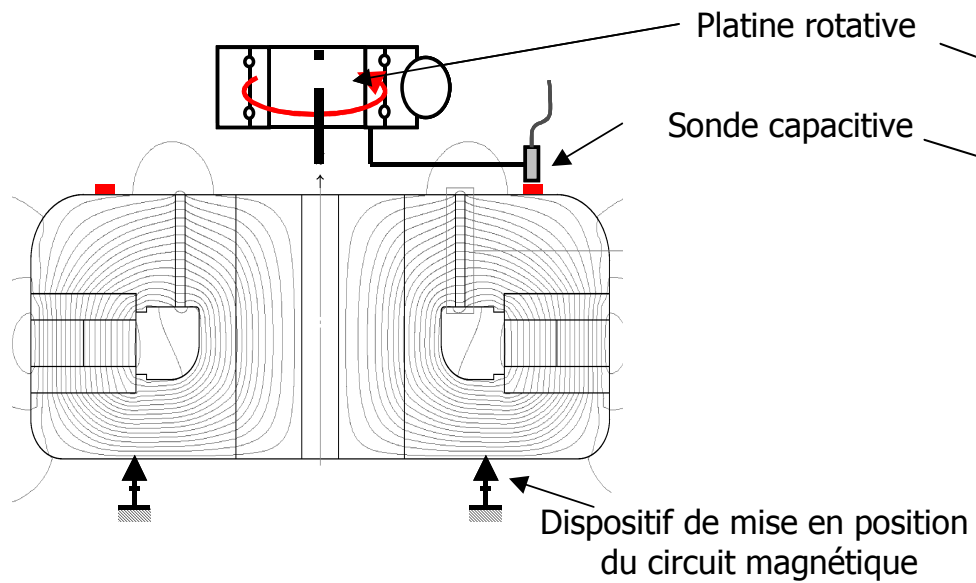
Inclinomètre



$$f(\theta) = M + A \cdot \cos \theta + B \cdot \sin \theta$$

Verticalité : $5 \mu\text{rad} \pm 5 \mu\text{rad}$

Alignement du champ magnétique dans le plan horizontal



Alignement du champ dans le plan horizontal: $5\mu\text{rad} \pm 10\mu\text{rad}$

Plan de l'exposé

- Unités SI et statut du Kilogramme
- Vers une redéfinition ?
- La balance du watt du LNE
- Participation du SYRTE : Gravimétrie

La balance du watt : principe

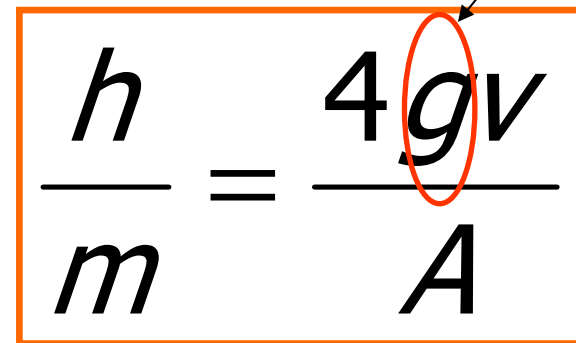
Effet Josephson $\rightarrow \varepsilon = n_1 f_1 / K_J \quad V = n_2 f_2 / K_J$

Effet Hall Quantique $\rightarrow R = k R_K / i$

$$mgv = \frac{A}{K_J^2 R_K}$$

$$A = \frac{n_1 f_1 n_2 f_2 i}{k}$$

$$K_J = 2e/h \text{ and } R_K = h/e^2$$


$$\frac{h}{m} = \frac{4gv}{A}$$

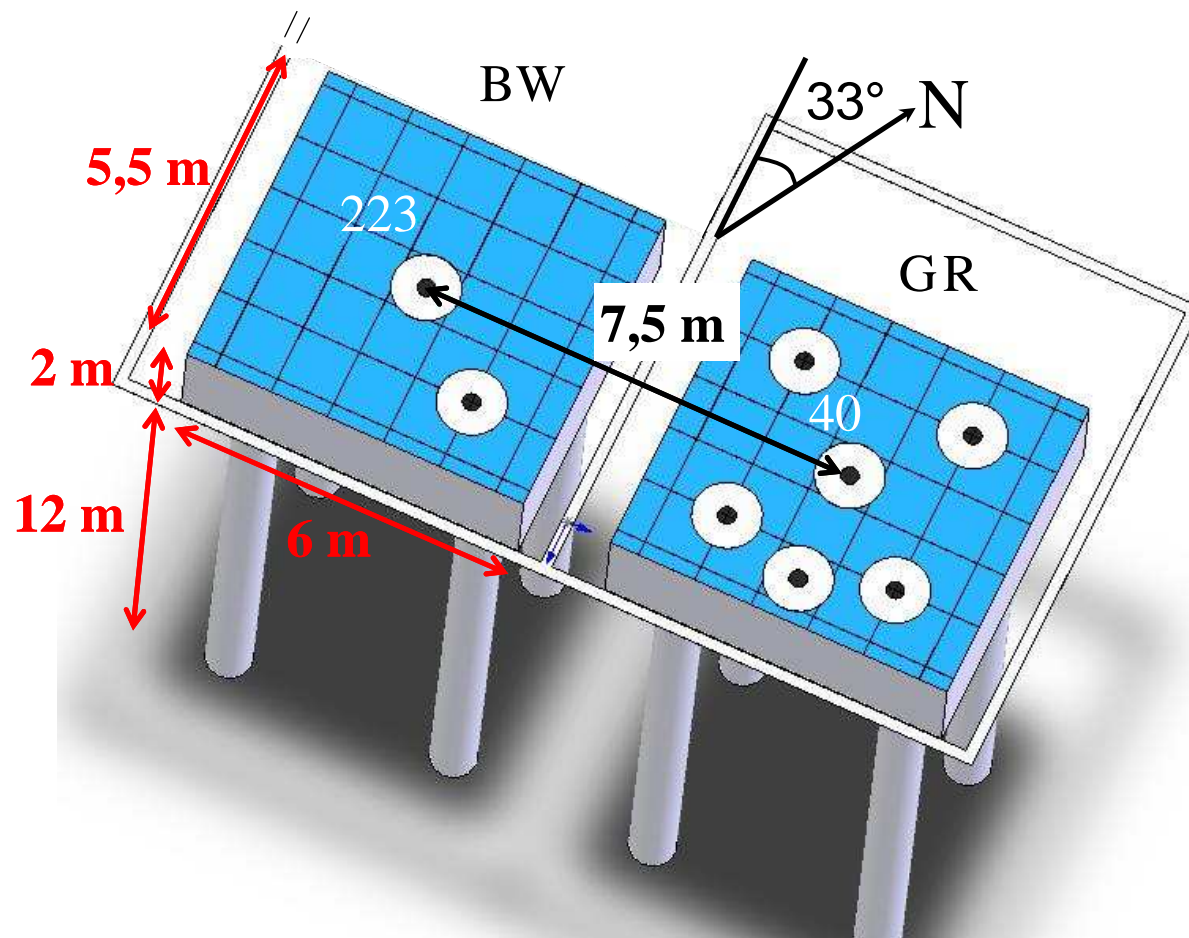
SYRTE

Laboratoires, cartographie et modélisation des variations de g

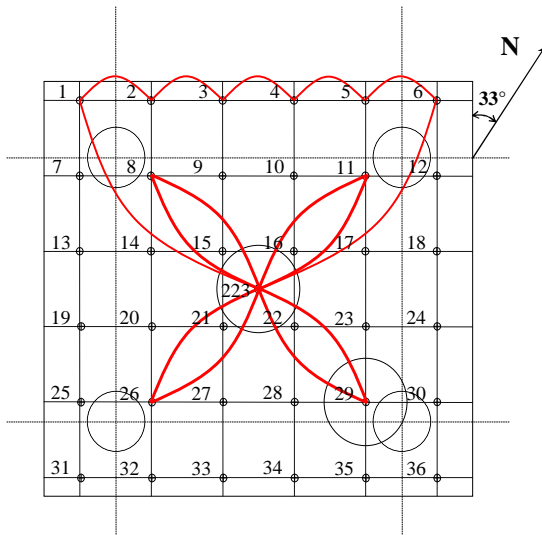
A l'aide d'un gravimètre relatif Scintrex CG-5

- Détermination des paramètres de marées
- Mesures de liens
- Cartographie 3D
- Modélisation 3D

74 stations dans un même plan, trois plans séparés de 50 cm



Cartographie horizontale



Mesures à 51.6 cm

2 mesures par position

1 jour par dalle

1 drift entre deux passages à la base (centre)

Liens entre les dalles entre différentes stations durant 6 mois : $sd(\Delta_{centres}) = 0.2 \mu Gal$

3 passages en 8 stations :
 $\mu Gal < sd < 2.3 \mu Gal$

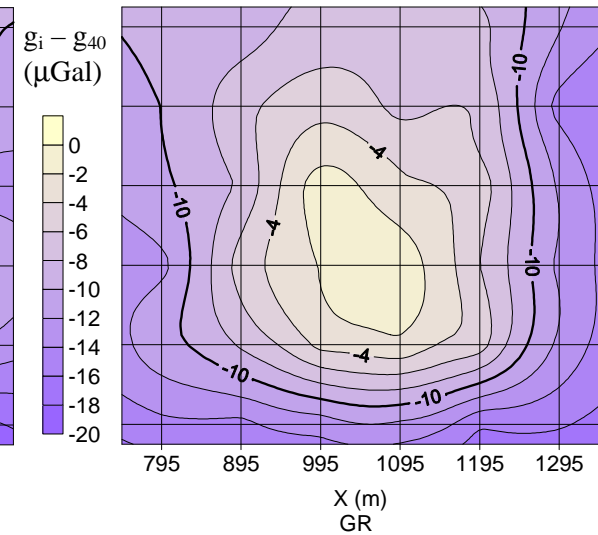
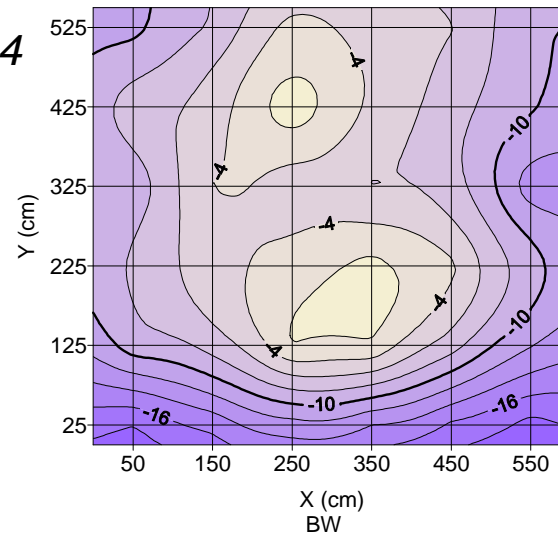
$sd_{BW} = 0.9 \mu Gal$; $sd_{GR} = 1.7 \mu Gal$

Corrections :

$\Delta g(N\hat{\uparrow}) = 0.808 \mu Gal.m^{-1}$

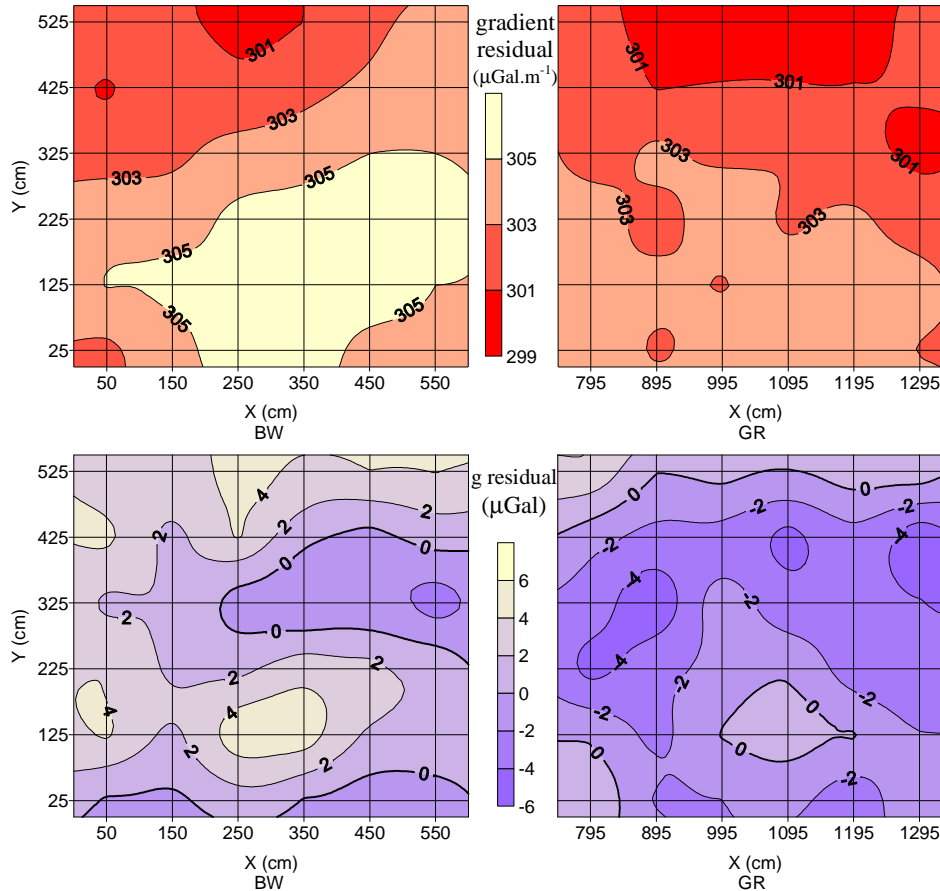
$\Delta g(h) \rightarrow 0.9 \mu Gal$

0.4



Incertitude des mesures : 1.6 – 2.2 μGal

Résidus, Δ modèle mesures



Minimisés en fitant les densités : $d_{\text{BW}} = 2.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (analyse $2.23 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) $d_{\text{GR}} = 2.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (analyse $2.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

sd = $1.7 \mu\text{Gal}\cdot\text{m}^{-1}$ sur les 74 points

sd = $0.9 \mu\text{Gal}\cdot\text{m}^{-1}$ aux centres (1m^2)

sd = $2.8 \mu\text{Gal}$ sur les 74 points

sd = $1.8 \mu\text{Gal}$ aux centres (1m^2)

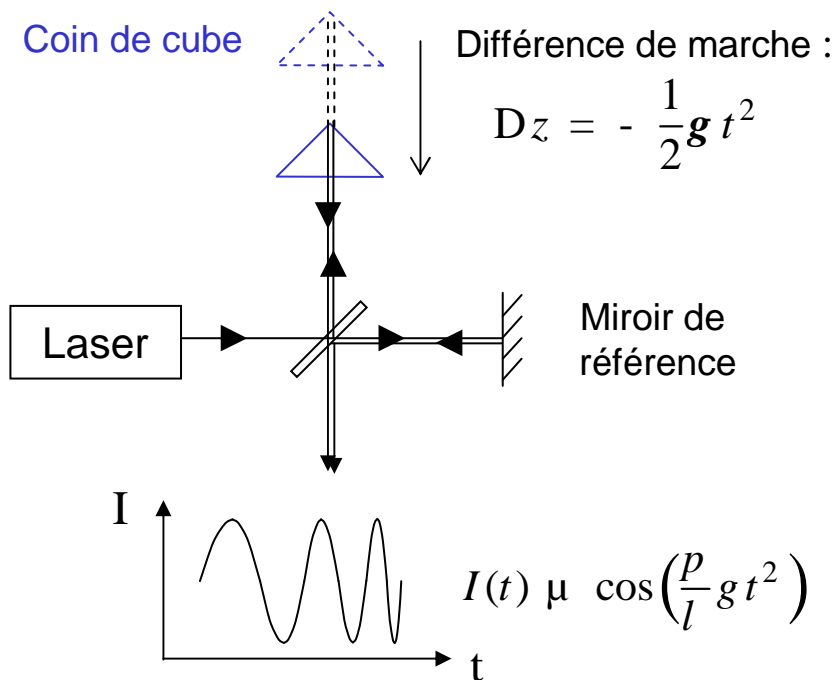
$U_{\text{VGG}} = 1.4 \mu\text{Gal}\cdot\text{m}^{-1}$ et $U_{\text{hor}} = 1.4 - 2.2 \mu\text{Gal}$, limités par les mesures

$U_{\text{modèle}} < 3 \mu\text{Gal}$ dans un volume de 50 m^3

Gravimètres absolus

Gravimètre optique

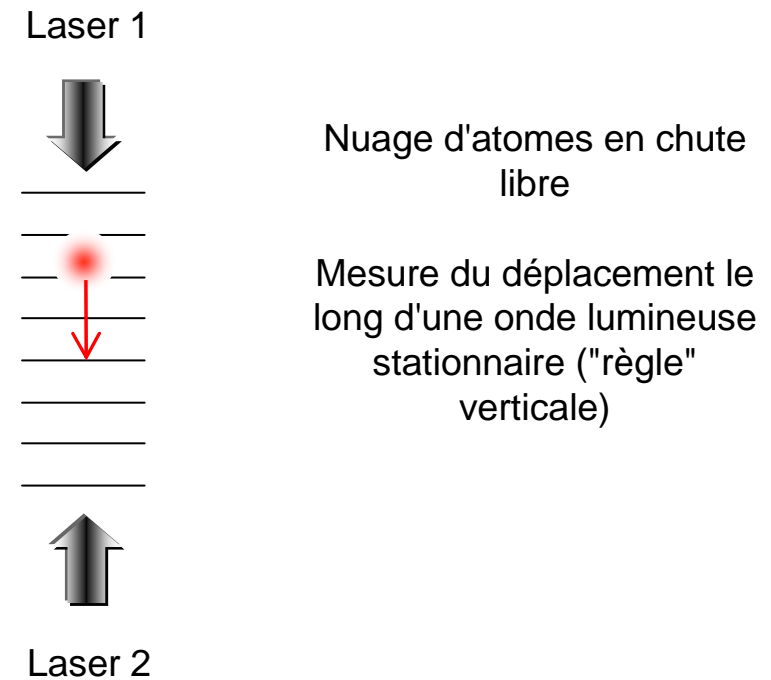
Principe : interféromètre de Michelson avec un **coin de cube en chute libre**



Exactitude : **$2 \cdot 10^{-9}$ g (FG5)**

Gravimètre atomique

Principe : interféromètre à ondes de matière



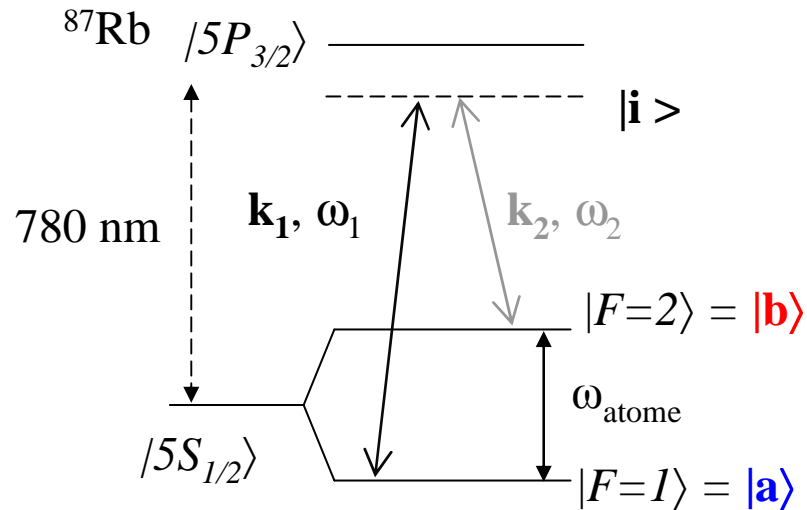
Exactitude : **$3 \cdot 10^{-9}$ g (Stanford 2001)**

Comparaison Balistique Vs Atomique

	Coin de cube	Atomes
Vibrations synchrones	Elevées	Faibles
Taux de répétition	Faible ~ 0,1 Hz	Elevé ~ 4 Hz
Vieillessement	Usure du chariot	Lasers
Technologie	Mature	Récente mais prometteuse
Balances du watt	UK, USA, Suisse, BIPM	France

Transitions Raman stimulées

Atome à 3 niveaux

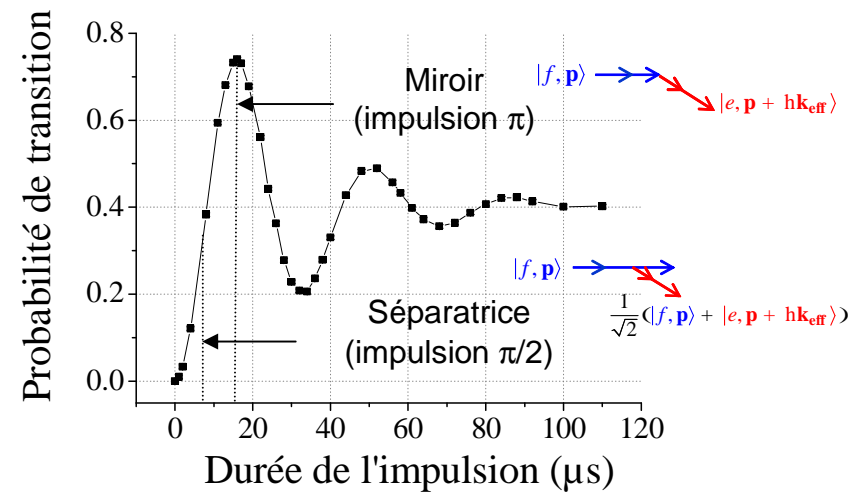
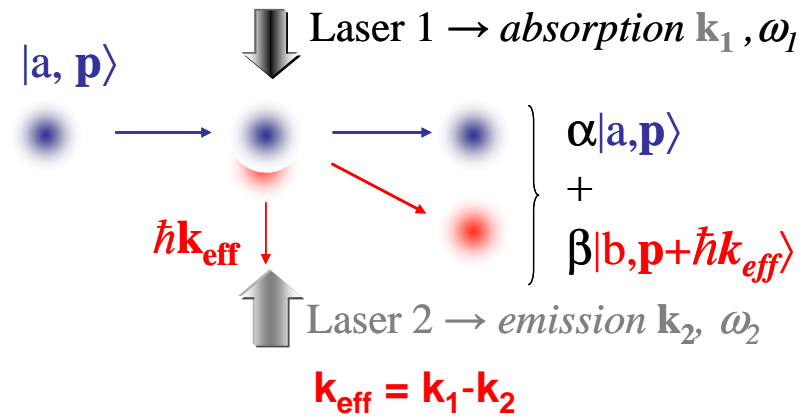


Transitions à deux photons couplant $|a\rangle$ et $|b\rangle$

Avantage des transitions Raman :

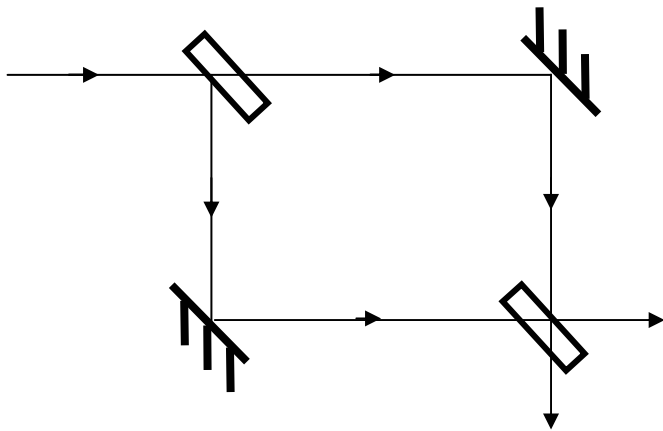
- Bijection état interne – état d'impulsion
- Détection sur l'état interne

Séparation cohérente des paquets d'onde



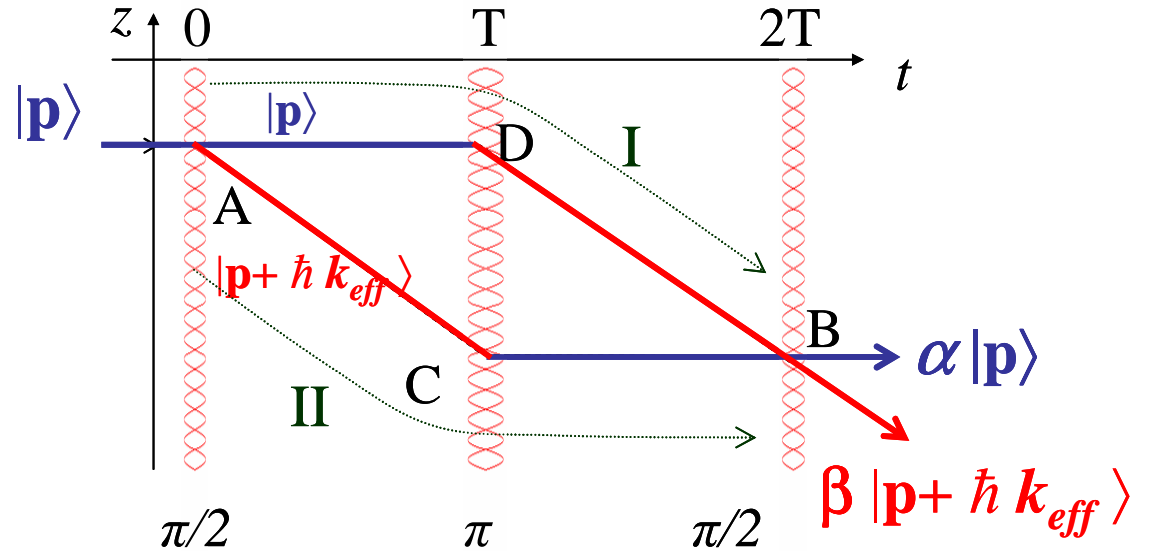
Interféromètres

Optique



Séparation cohérente du paquet d'onde (O ou A) en deux

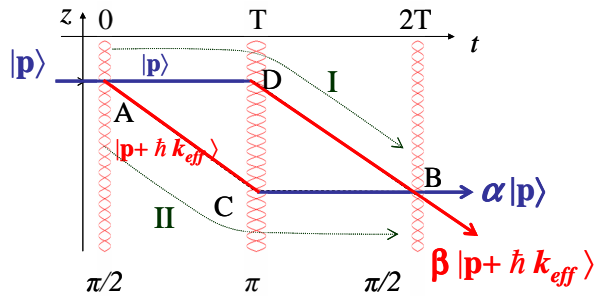
Atomique



$$\begin{aligned}
 P_{|p\rangle \rightarrow |p+\hbar k_{eff}\rangle} &= \frac{N_{|p+\hbar k_{eff}\rangle}}{N_{|p\rangle} + N_{|p+\hbar k_{eff}\rangle}} = \frac{N_{|b\rangle}}{N_{|a\rangle} + N_{|b\rangle}} \\
 &= \frac{1}{2}(1 - C \cos \Delta\Phi)
 \end{aligned}$$

Interféromètre de Mach-Zehnder Interféromètre atomique

Sensibilité à l'accélération



- La différence de phase entre les lasers est imprimée sur les atomes durant les transitions :

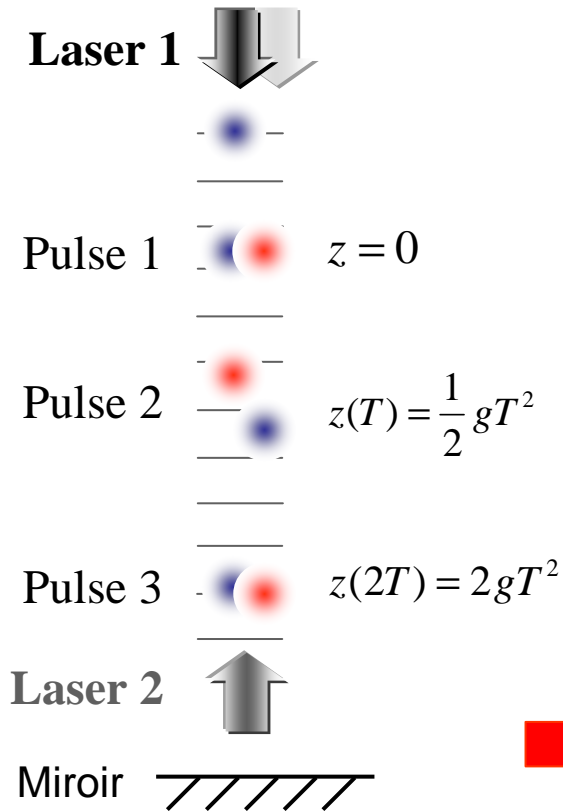
$$\phi(t) = \omega_{eff} t - \vec{k}_{eff} \cdot \vec{z}(t) + \varphi_{eff}(t)$$

- Différence de phase interférométrique :

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= \Phi_{II} - \Phi_I \\ &= (\phi_A - \phi_C + \phi_B) - (\phi_D) \\ &= \phi(0) - 2\phi(T) + \phi(2T) \end{aligned}$$

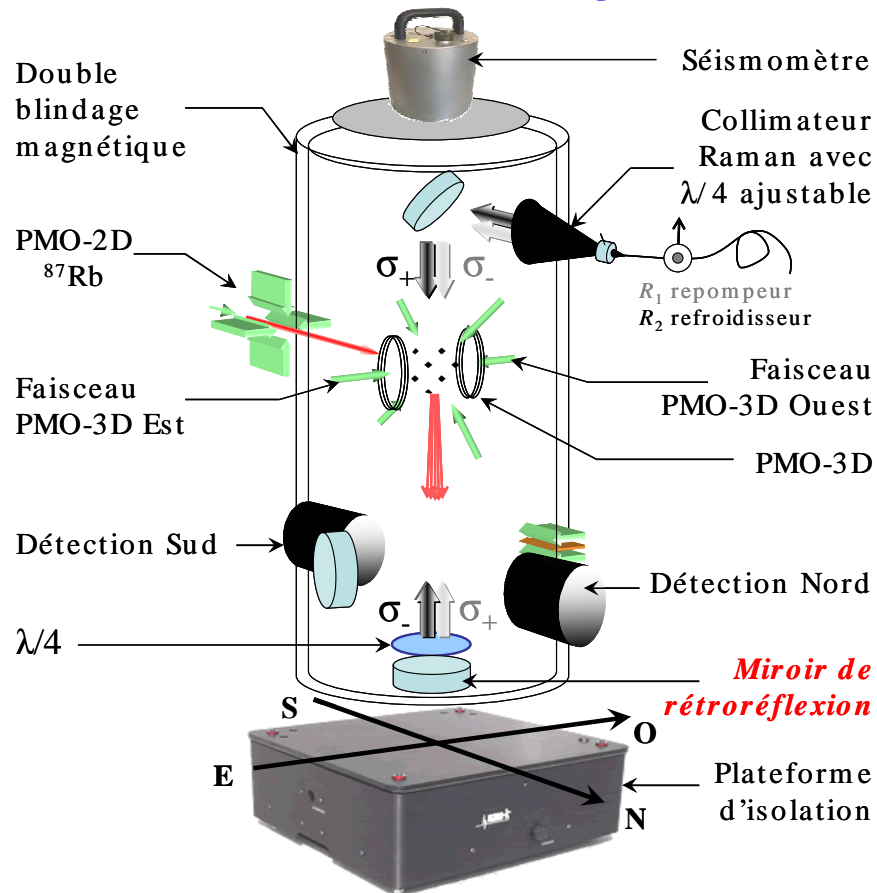
$$\Delta\Phi_{int} = -\vec{k}_{eff} \cdot \vec{g} T^2 + \delta\Phi_{noise} + \delta\Phi_{sys}$$

Plans équiphasés définis par la position du miroir

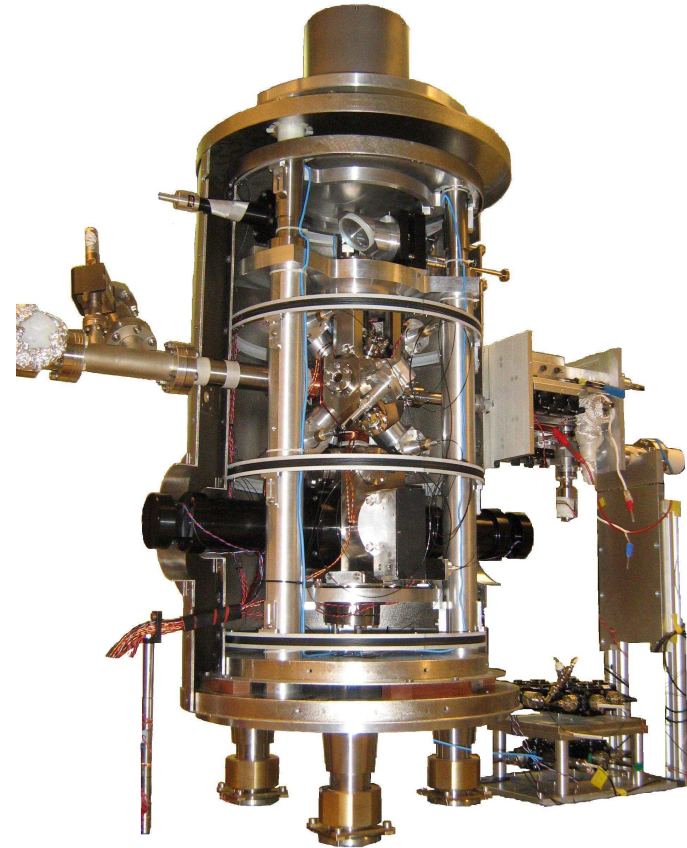


Mesure atomique = mesure du déplacement relatif atomes/miroir

Dispositif expérimental



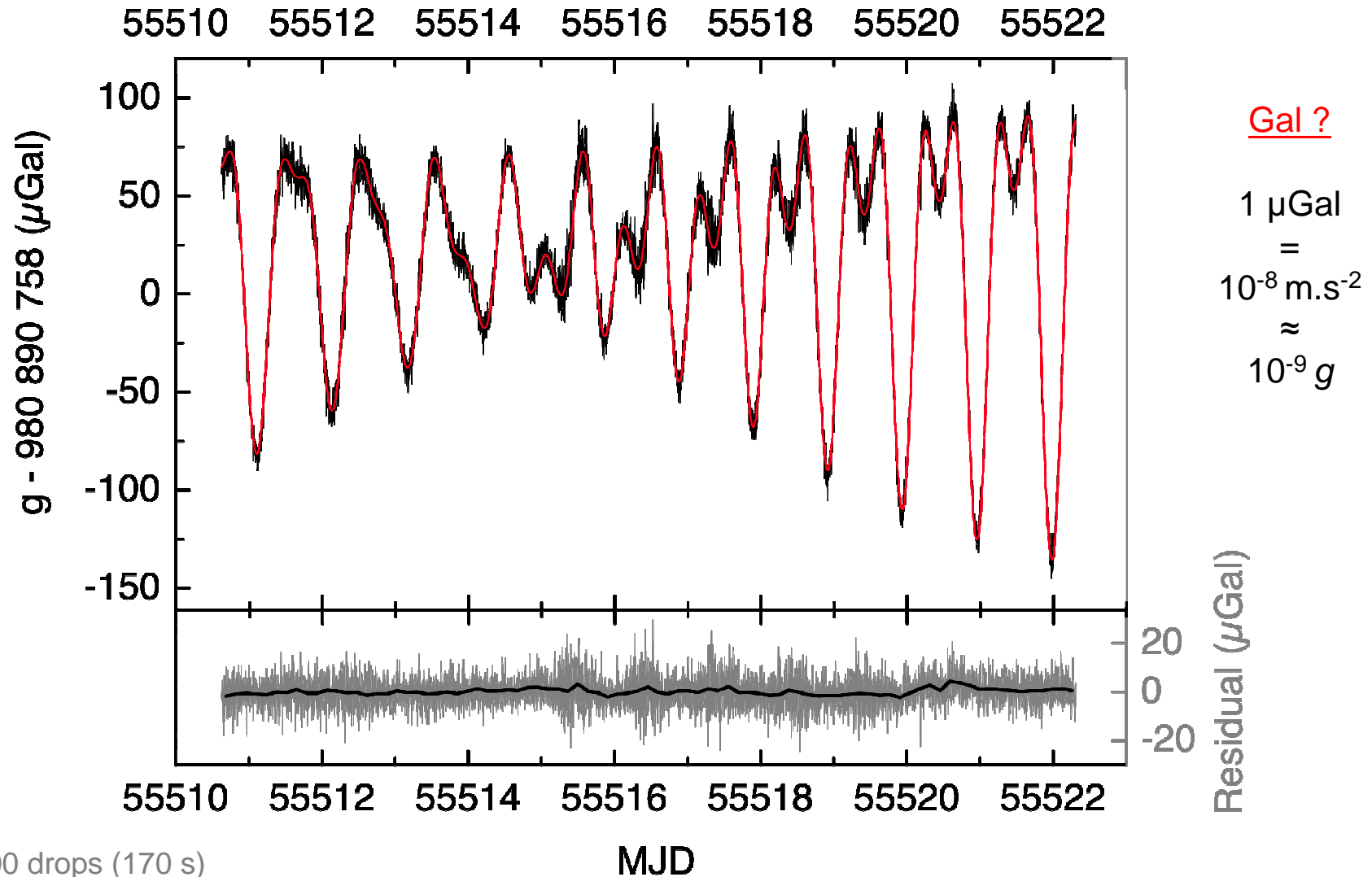
1,4 m



Incertitude : $4,8 \times 10^{-8} \text{ m.s}^{-2}$ dominée par l'incertitude du biais associé aux aberrations du front d'onde ($4,0 \times 10^{-8} \text{ m.s}^{-2}$) \Rightarrow limiter l'expansion balistique du nuage en refroidissant davantage les atomes.

Comparaisons au BIPM (ICAG'09) et Luxembourg (ECAG'11), mesures au LSBB

12 jours de mesures en continu



Gray: 400 drops (170 s)

Black: 10 000 s

Perspectives

Prochaine CGPM : Octobre 2014

Réunion CIPM : Septembre 2013 : OK, 2014 : trop tard

CCM : Mai-Juin 2013 : OK, 2014 : trop tard

Projet EMRP : KNOW – Kilogram Now

METAS, LNE ... (BW), PTB, INRIM ... (NA)

But : Trouver la (les) source(s) de l'écart

Proposer une mesure de h européenne

A temps pour la prochaine CGPM?