





# La balance du watt

un système mécatronique complexe au service de la Métrologie



Suat Topçu (LIRIS-CNRS)



Université Libanaise – Beyrouth le 07/02/2005

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topçu Beyrouth 2005

- I) *Introduction à la problématique*
- II) Quelques méthodes pour redéfinir l'unité de masse
- III) Un système mécatronique : « Balance du Watt »
- IV) Description : Mécanique – Capteur – Automatique - Electronique
- V) Conclusion

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topçu Beyrouth 2005

« Le **kilogramme** est l'unité de masse; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme. »

1<sup>ère</sup> CGPM, 1889 et 3<sup>ème</sup> CGPM, 1901

Masse cylindrique (diamètre = hauteur ≈ 39mm)  
Matériau: platine iridiée (10% Ir)



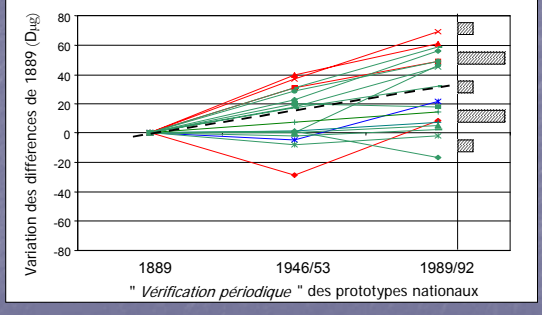
Photo BIPM



*Le Kilogramme et le Mètre étalon défini en 1799 et conservés depuis au Bureau International des Poids et Mesures à Sèvres (Paris).*

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topçu Beyrouth 2005

### Évolution de la masse de prototypes en Pt/Ir



2 intercomparaisons entre les 50 étalons nationaux depuis 1889 par rapport au « K » ont montré une divergence de masse de 100 µg

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topçu Beyrouth 2005

### Résolution n° 7 de la 21<sup>e</sup> CGPM: la définition du kilogramme (1999)

La 21<sup>e</sup> e Conférence générale des poids et mesures, considérant

- le besoin d'assurer la stabilité à long terme du SI,
- l'incertitude intrinsèque relative à la stabilité à long terme du prototype qui sert à définir l'unité de masse, l'une des unités de base du SI,
- que cette incertitude se répercute sur la stabilité à long terme des trois autres unités de base du SI, notamment l'ampère, la mole et la candela, dont la définition dépend de celle du kilogramme,
- les progrès déjà obtenus dans différentes expériences destinées à relier l'unité de masse à des constantes fondamentales ou atomiques,
- qu'il est souhaitable de disposer de plusieurs méthodes pour réaliser ce lien,

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.

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topçu Beyrouth 2005

- I) Introduction à la problématique
- II) *Quelques méthodes pour redéfinir l'unité de masse*
- III) Un système mécatronique : « Balance du Watt »
- IV) Description : Mécanique – Capteur – Automatique - Electronique
- V) Conclusion

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topçu Beyrouth 2005

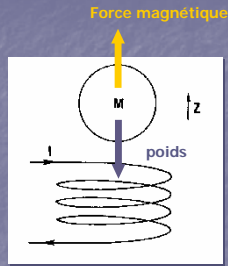
## Lévitation magnétique

AIST (NRLM), VNIIM

$$Mg = \frac{d}{dz} \left( \frac{1}{2} L(z) I^2 \right)$$

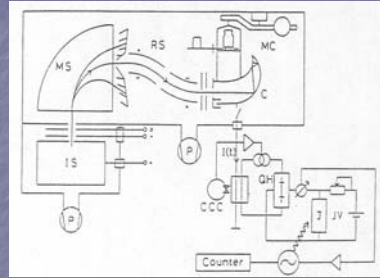
Quelques défauts réhibitoires:

- Effet Meissner incomplet
- Matériau et surface de la masse
- Masse en milieu cryogénique



Incertitude: qqs  $10^{-6}$ ? Actuellement  $10^{-9}$

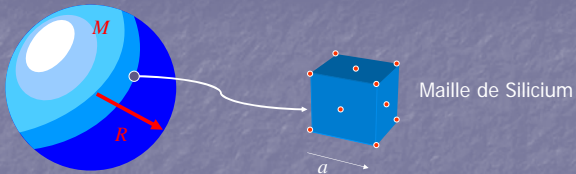
## Comptage d'ions (PTB)



$$I = \frac{M \cdot N_A \cdot e}{m_{Au} \cdot t}$$

Incertitude:  $1 \times 10^{-3}$

## Sphère de silicium (DE,US,AU,IT,JP)



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

Incertitude:  $1 \times 10^{-7}$

- I) Introduction à la problématique
- II) Quelques méthodes pour redéfinir l'unité de masse

### III) Un système mécatronique : « Balance du Watt »

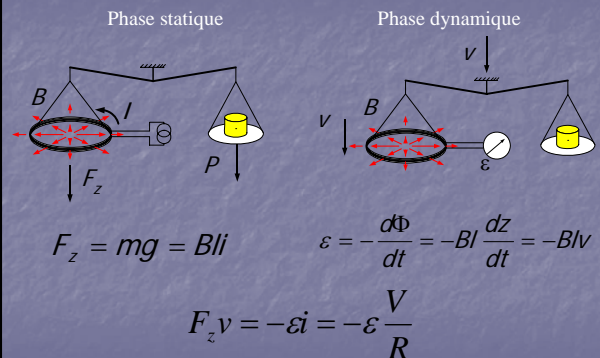
- IV) Description : Mécanique – Capteur – Automatique - Electronique
- V) Conclusion

## Balance du Watt

Les objectifs de ce projet

- ➔ Détermination conjointe de :
  - la constante de Josephson  $K_J$
  - la stabilité de l'unité de masse  $K$
  - la constante de Planck  $h$
- ➔ Incertitude relative: de l'ordre de  $10^{-9}$
- ➔ Perspectives :
  - nouvelle définition de l'unité de masse

## La Balance du Watt



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

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

Effet Hall quantique →  $R = k R_K / i$

$$mgv = \frac{A}{K_J^2 R_K} \quad A = \frac{n_1 f_1 n_2 f_2 i}{k}$$

$$K_J = 2e/h$$

$$R_K = h/e^2$$

Pour avoir  $\sigma_m/m = 10^{-8}$ , chaque terme doit être mesurée avec une incertitude de  $10^{-9}$

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

## Nouvelles définitions possibles du Kilogramme

### Balance du Watt

« The kilogram is the mass of a body at rest whose equivalent energy equals the energy of a collection of photons whose frequencies sum to  $135\,639\,274\,10^{12}$  Hz »

$$h = \frac{(1\text{ kg})(299\,792\,458\text{ ms}^{-1})^2}{135\,639\,274\,10^{12}\text{ Hz}} \quad h = 6.6260689\dots 10^{-34}\text{ Js}$$

(B.N. Taylor, P.J. Mohr, Metrologia, 1999, 36, 63-64)

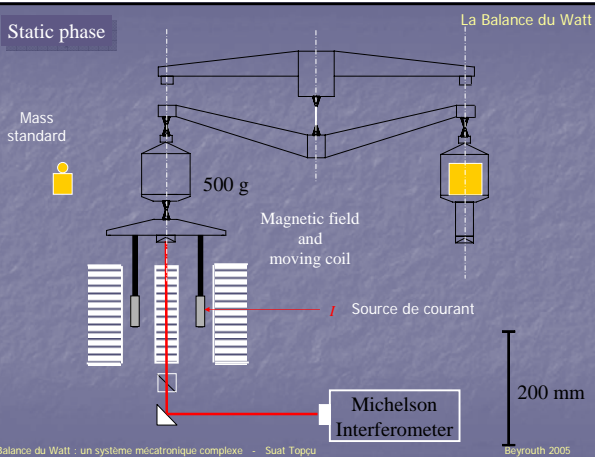
### Silicium

« The kilogram is the mass of  $5.018\dots 10^{25}$  free  $^{12}\text{C}$  atoms at rest and in their ground state »

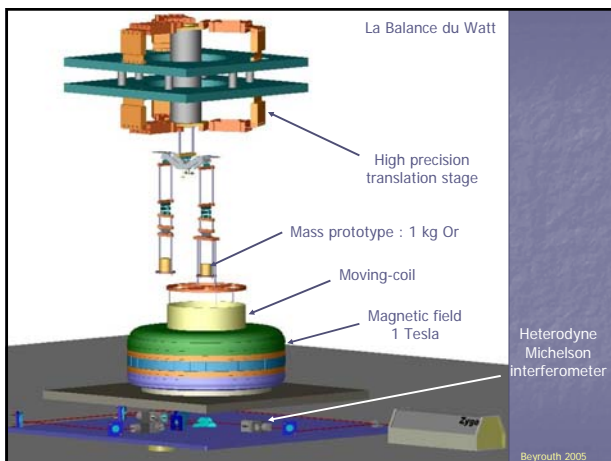
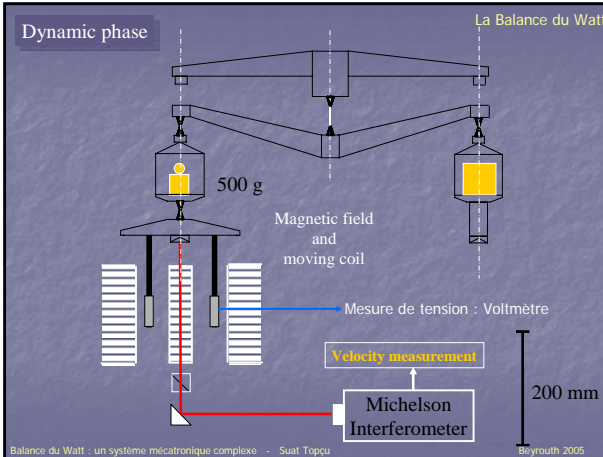
« The mole is the amount of substance of a system that contains  $6.022\dots 10^{23}$  specified entities »

(B.N. Taylor, Metrologia, 1994, 31, 181-194)

### Static phase



### Dynamic phase



## Incertitudes

		Incertitude-type en $10^{-9}$	
		NIST(1998)	projet
répétabilité		30	15
références de transfert	masse	20	14
	résistance	8	2
	tension	30	1
	déplacement	5	2
	fréquence	5	1
	accél. pesanteur	7	5
grandeurs externe	indice de réfraction	43	0
	corr. poussée de l'air	23	0
	alignements	40	10
	résistance de fuite	20	1
	profil champ d'induction	20	0
	hystérésis couteaux	20	0
	bruits RF	10	0
	<b>Total</b>	<b>87</b>	<b>18</b>

La Balance du Watt

## Locaux – Paris

2 m  
couche terrestre

15 m  
couche molle

couche dure

Un local spécifique est construit pour accueillir la Balance

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

La Balance du Watt

## N.P.L. Angleterre

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

La Balance du Watt

## N.I.S.T. USA

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

La Balance du Watt

## M.E.T.A.S. Suisse

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

I) Introduction à la problématique

II) Quelques méthodes pour redéfinir l'unité de masse

III) Un système mécatronique : « Balance du Watt »

**IV) Description : Mécanique – Capteur – Automatique - Electronique**

V) Conclusion

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

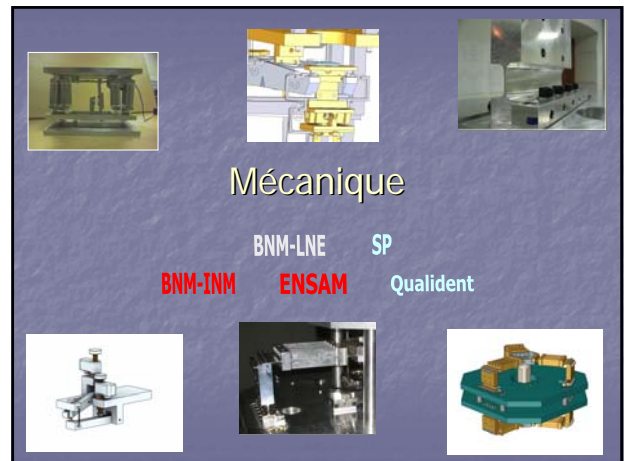
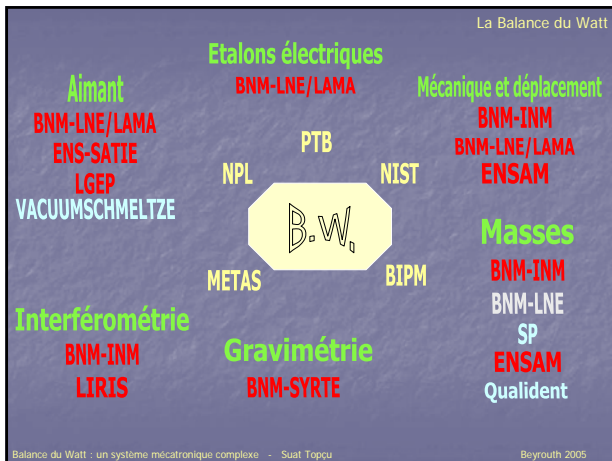
La Balance du Watt

## Mécanique – Automatique Capteur – Electronique

- 7 Laboratoires
- 1 Organismes d'état
- 3 Industriels
- 5 Organismes internationaux

- 17 spécialistes pour l'ensemble des domaines
- 7 Ingénieurs étude et Recherche
- 3 Techniciens
- 5 Doctorants

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005



### Mécanisme de translation de la bobine

Cahier des charges :

- Course de 80 mm
- Déplacement vertical, rectitude de l'ordre du  $\mu\text{m}$
- Variation de la vitesse inférieure à  $10^{-9}$
- fonctionnelle sous Vide

Découplage des fonctions :

- Actionneur
- Mécanisme de guidage
- Compensation de la charge

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

### Rectilinear motion

1 degree of freedom guiding system : vertical translation.

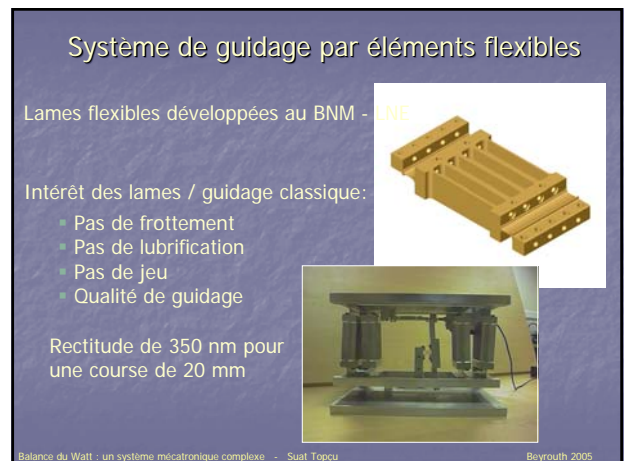
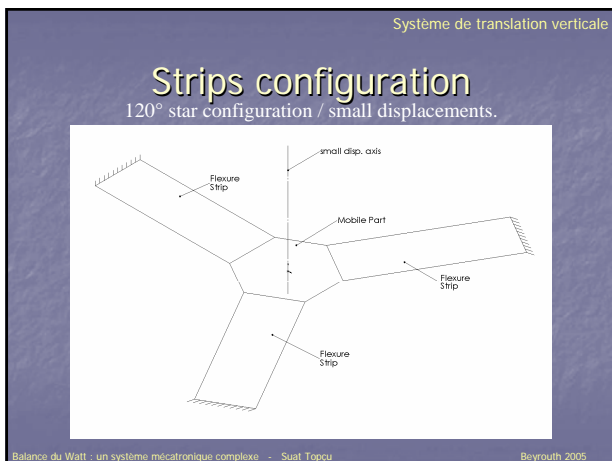
Considering the specifications  $\rightarrow$  flexure strips.  
main reasons : no lubrication, no friction.

The choice of a particular design to reach performance (straightness) is led by the **symmetrical** arrangement about the axis of translation :

- geometry of the mechanical elements,
- symmetrical loading.

The way flexure strips deform is "not so important".

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005



Système de translation verticale

## Straightness properties

Mobile part : 6 dof.  
5 (Tx, Ty, Rx, Ry, Rz) to be measured as defects of displacement.

Rotation angle ~ 15°  
thickness 0.6mm

Balance du Watt : un syst... Beyrouth 2005

Système de translation verticale

## Machined flexure strips

Rotation angle ~ 4° min.  
thickness 0.8mm

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

Système de translation verticale

## Système de guidage

Qualité de guidage  
= SYMETRIE axiale du système mécanique

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

Système de translation verticale

## Flexure strips guiding system

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

### Éprouvettes en cuivre béryllium (Réalisation Renard et Sacquet)

Épaisseur de lames ≅ 0.04 mm

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

### Éprouvettes en cuivre béryllium (Réalisation LNE)

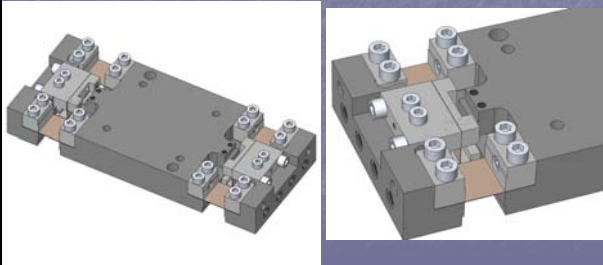
Épaisseur de lames ≅ 0.06 mm

Fissure

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

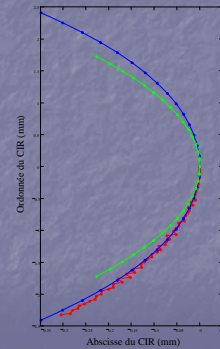
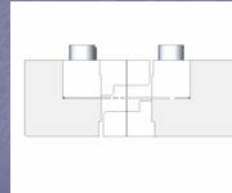
# Nouveaux éléments flexibles

Remplacement des lames issues du projet Nanométrie



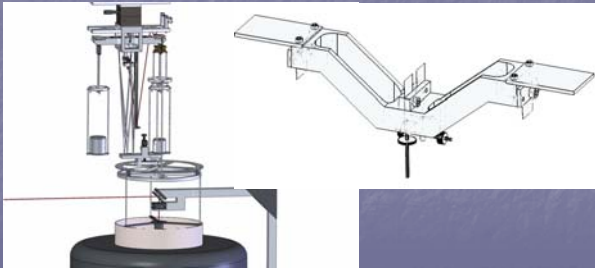
# Apparent centre of rotation

XY position (mm) of COR as a function of prescribed angle of deflection of the rigid part.



# Comparateur : fléau symétrique à lames flexibles

- Portée: suffisante Répétabilité: 0,1 $\mu$ m (1 mm de cheveux)
- Alignement de la force électrique et de la force de gravitation
- Suspension: lames flexibles  $\Rightarrow$  asservissement du fléau + travail à charge constante (butée)
- Placée sous vide (échangeur, sas)

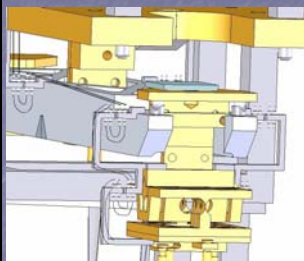


Nouveau prototype de fléau  
Réalisation société Méca-Dumont

Éléments de suspension  
Réalisation société Méca-Dumont



# Intégration du comparateur de force



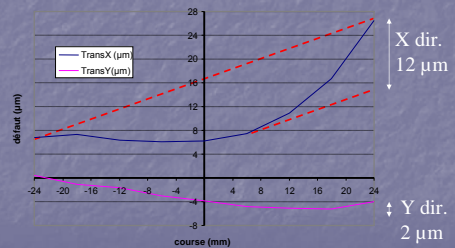
Passage de fils électriques

Moteurs piézo-électriques du piston et de la butée

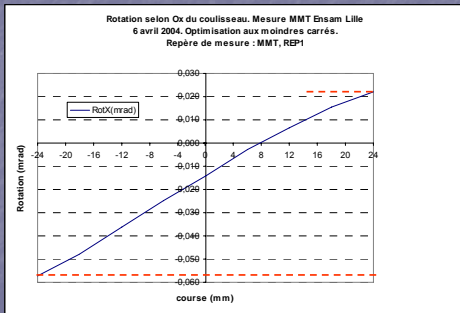


# Straightness / translation dof

Déplacement XY du coulisseau. Mesure MMT Ensam Lille  
6 avril 2004. Optimisation aux moindres carrés.  
Repère de mesure : MMT, REP1



## Straightness / rotation dof



Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

### Capteur

**BNM-INM BNM-SYRTE LIRIS**

## Instrumentation et capteurs optiques

### 5 points de mesure / 1 point de contrôle

- Mesure de l'horizontalité du fléau
- Mesure de la verticalité de la bobine
- Mesure de la direction du champ de gravitation terrestre
- Mesure de l'horizontalité du champ magnétique
- Mesure du champ de gravitation terrestre
- Contrôle de la vitesse de déplacement de la bobine (phase dynamique)

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

### Mesure de l'horizontalité du fléau

Static phase

Mass standard 500 g

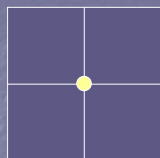
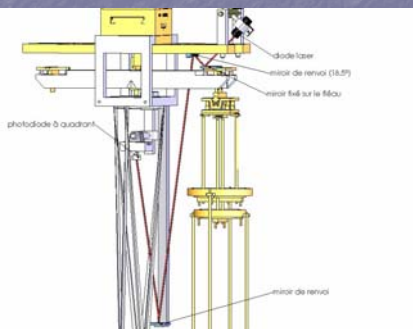
0 mm

Nécessité d'un capteur pour retrouver le point zéro

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

## Mesure de l'horizontalité du fléau

**Principe :** Un faisceau laser éclaire un détecteur 4 cadrants après réflexion sur trois miroirs dont l'un est fixé sur un des bras du fléau



Diode rouge 635 nm  
SDL633 - Thorlabs  
• Puissance : 5 mW  
• stabilisé en puissance (courant et température)

La **précision** est limitée par la résolution en pixel du détecteur et par les vibrations mécaniques ambiants : ~ 3  $\mu$ rad

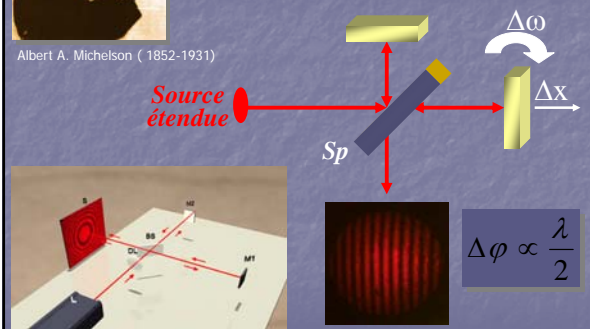
Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

## Mesure de la verticalité de la bobine

**Principe :** Mesure angulaire par interférométrie de michelson



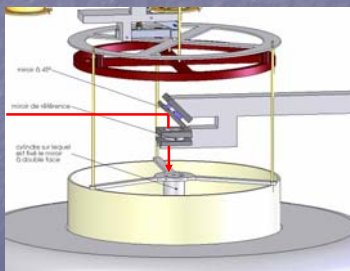
Albert A. Michelson ( 1852-1931)



Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

Mesure de la verticalité de la bobline

**Principe :** Mesure angulaire par interférométrie de michelson




Interféromètre AXIOM 2/20 de ZYGO  
 Résolution : 1,25 nm / 0,06"  
 Course : 2 m

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

Mesure de la direction du champ de gravitation terrestre

Loi de snell-Descartes



précision : 10 µrad

précision : 0,1 µrad

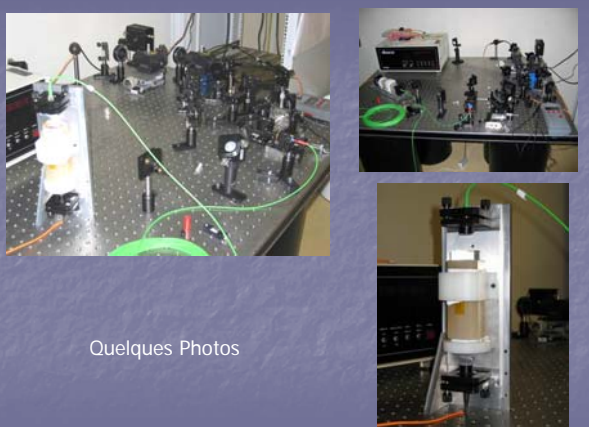
erreur en cosinus

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

Cahier de charge : 1 µrad

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

Quelques Photos



Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

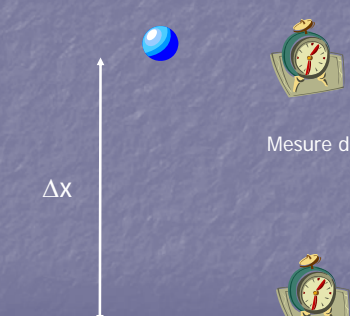
Gravimétrie: objectif

$$\frac{m}{h} = \frac{A}{4gv} \quad g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

- Détermination de  $g$  au centre de gravité de la masse étalon
- Détermination absolue de  $g$  (marées, charge des océans, nappe phréatique...)
- Transfert: cartographie (gravimètre relatif) modélisation
- Incertitude espérée: 1 µgal

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

Principe de la mesure de  $\vec{g}$



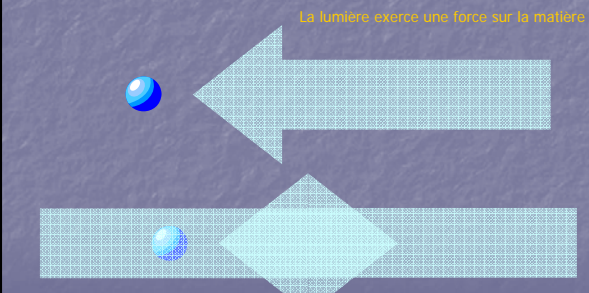
Mesure de l'intervalle de temps  $\Delta t$

$$mg = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

Jeu d'atomes

La lumière exerce une force sur la matière



On réalise ainsi un piège pour atomes

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

### Caractéristiques du gravimètre

- Chargement par un piège 2D ( $\sim 10^9$  at/s)
- Piège magnéto-optique de Rb ( $10^9$  at)
- Pas de vitesse initiale

Sélection d'un état  $M_l=0$  et Sélection en vitesse

- Fonctionnement temporel (2T ~ 100 ms)
- Transition Raman stimulée

- Détection avec normalisation ( $F=1$  et  $F=2$ )

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

### Gravimètre balistique / Gravimètre à atomes froids

**Table 8. Comparison between atom interferometer and falling corner-cube gravity measurements. An independent measurement of the gravity gradient (using LaCoste-Romberg spring-type gravimeters) is used to compensate for the difference in measurement height. The atom interferometer gravity value is slightly higher.**

	Value/1Gal
Atom interferometer gravity value	$979933158 \pm 3$
Falling corner-cube gravity value	$-979933298 \pm 2$
Measurement-height correction	$+147 \pm 5$
Environmental effects	$0 \pm 2$
Difference	$7 \pm 7$

$g = 9,813\,245\,67(1) \text{ m/s}^2$

Figure 25. Comparison between atom interferometer (lower data set) and classical gravimeter (upper data set). Each point represents 1 min of tide-corrected gravity data. The continuous lines are running averages (30 min). The histograms show distribution of the 1 min data points around the mean (for every 30 min interval). Compared with the classical instrument, the measurement noise of the atom interferometer is smaller by a factor of 4 for equivalent measurement times. The noise per drop (hunch), on the other hand, is comparable. Both instruments observe a slight increase in  $g$  over the measurement period owing to changes in atmospheric pressure (see Section 5.6).

Peter, Chung, Chu, Metrologia, 2001, 38, 25-61

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

## Automatique

**BNM-INM LIRIS**

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

### Phase Dynamique de la Balance du Watt

Automatique

Un défi majeur du projet :

asservir et contrôler la vitesse de déplacement de la bobine  
 $v = 2\text{mm/s}$  avec une exactitude de  $2 \text{ pm/s}$

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

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005



### Automatique

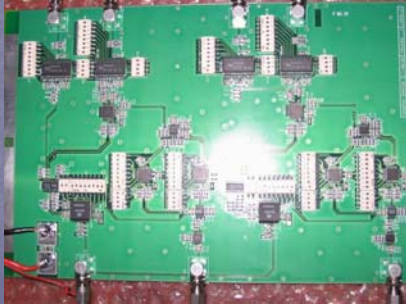
Un système mécanique de translation à deux étages :

Aerotech et céramique piézoélectriques

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

## High frequency Phase-shifting electronic board

(home-made)



Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

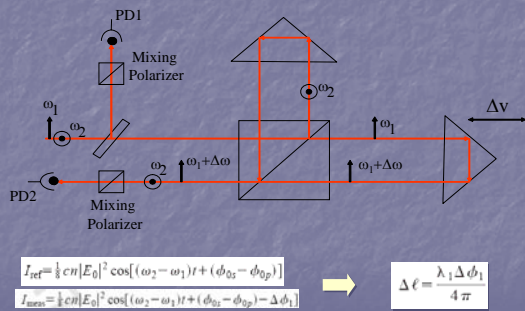
## Principle of Doppler effect

**Effet Doppler :** Plus la voiture se rapproche du piéton, plus le son perçu par ce dernier est aigu

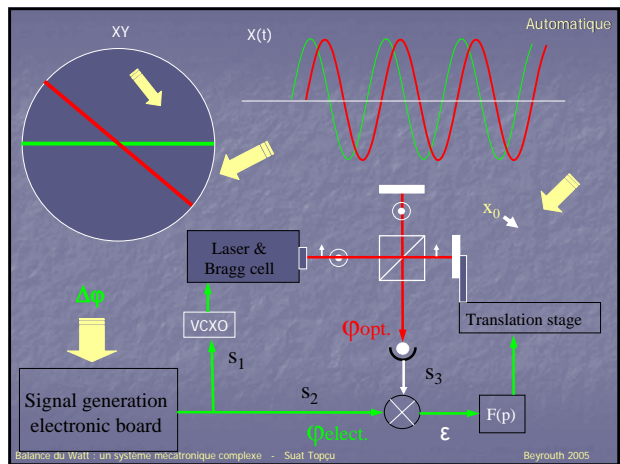


Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

## Principle of heterodyne interferometer

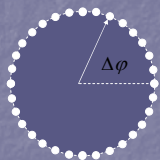


Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005



Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

## Principe



$$\Delta\phi = 2\pi \rightarrow \Delta x = \lambda/2$$

$$\frac{\Delta\phi}{32} \rightarrow \Delta x = \lambda/64$$

In our case :

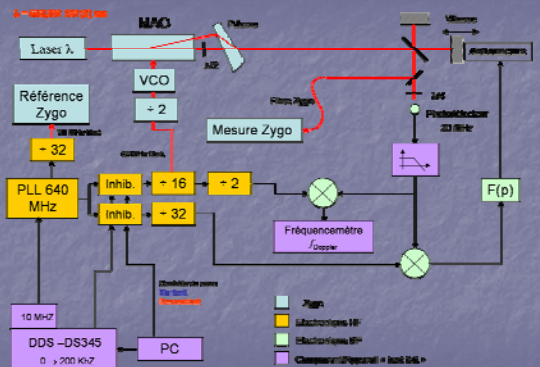
$$\Delta\phi = 2\pi \rightarrow \Delta x = \lambda/4 \sim 158 \text{ nm}$$

$$\frac{\Delta\phi}{32} \rightarrow \Delta x = \lambda/128 \sim 5 \text{ nm}$$

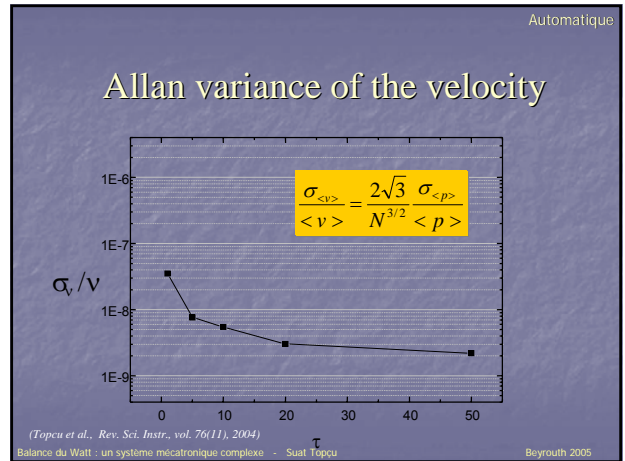
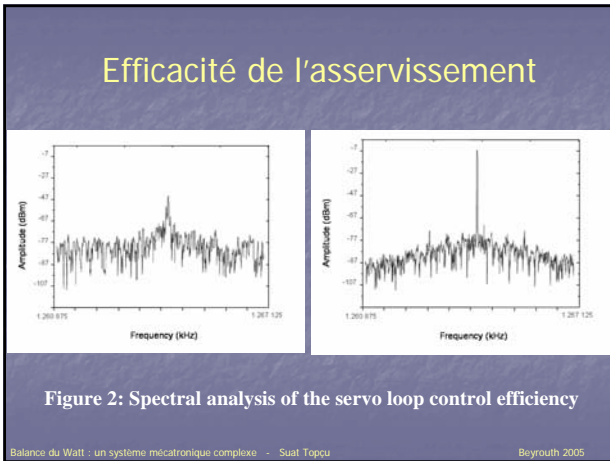
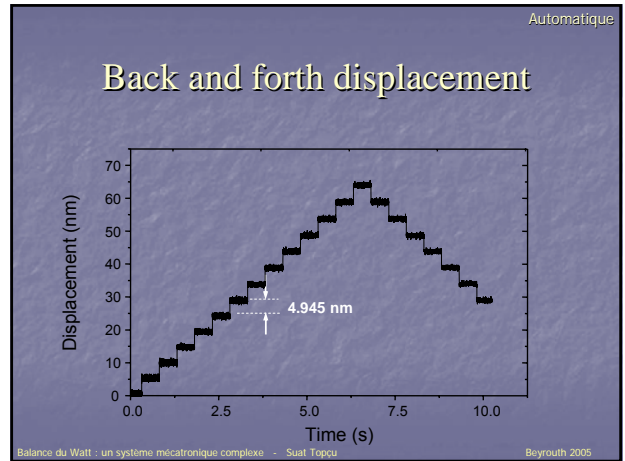
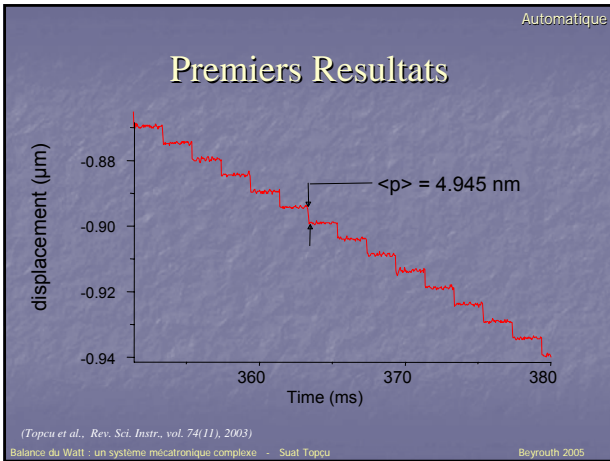
Exact value :  $\lambda = 632.991\ 508(1) \text{ nm} \rightarrow \Delta x = 4.945\ 216\ 313(8) \text{ nm}$

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005

## Interféromètre: principe



Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005



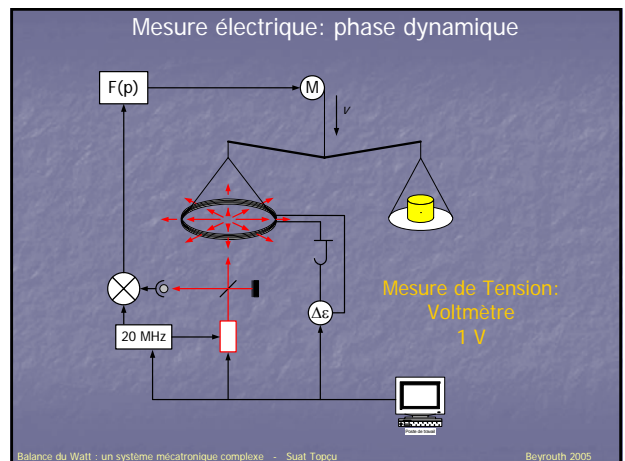
## Electronique

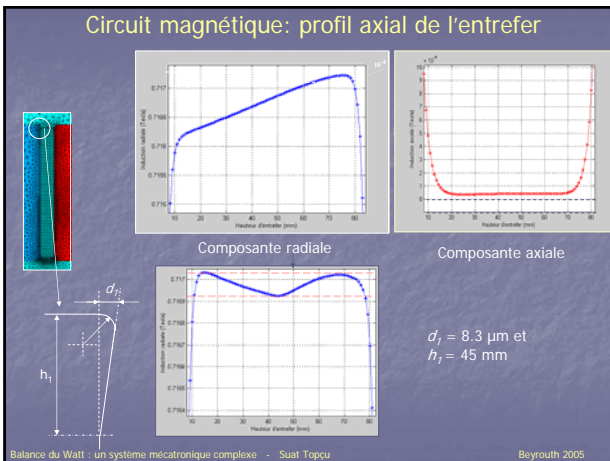
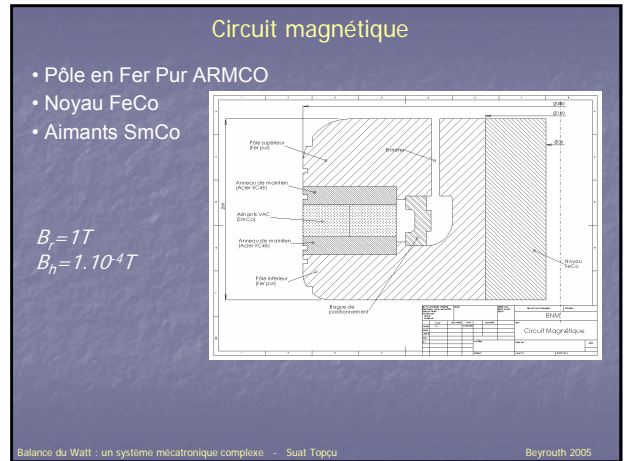
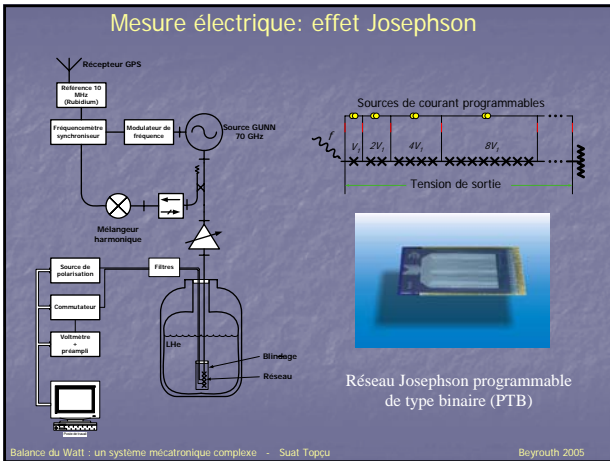
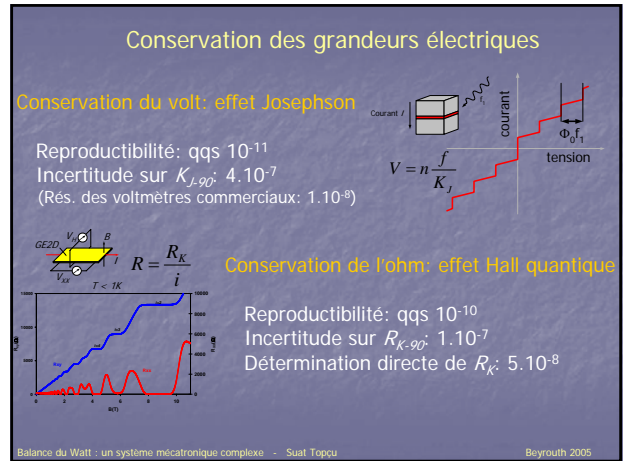
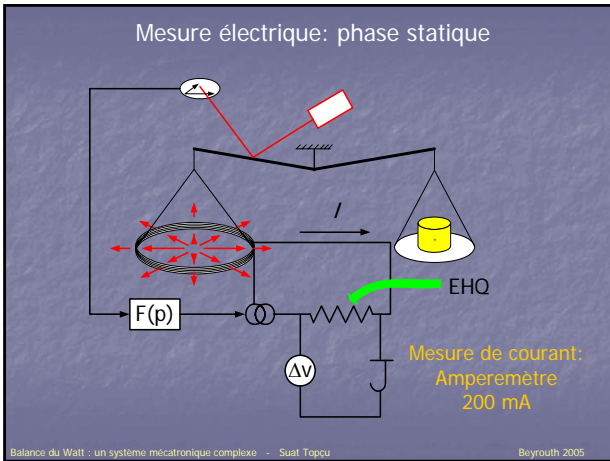
Courant  $I$

GE2D  $V_H$   $B$   $I$   $V_{xx}$   $T < 1K$

BNM-LNE/LAMA
ENS-SATIE  
LGEP
VACUUMSCHMELTZE

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu Beyrouth 2005



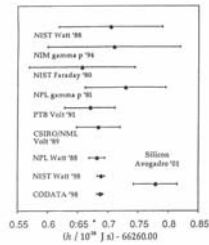


- I) Introduction à la problématique
  - II) Quelques méthodes pour redéfinir l'unité de masse
  - III) Un système mécatronique : « Balance du Watt »
  - IV) Description : Mécanique – Capteur – Automatique - Electronique
  - V) **Conclusion**
- Beyrouth 2005

## The Planck constant

$$h = 6.626\ 068\ 91(58) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

Williams et al, "Accurate Measurement of Planck's Constant, *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 81, pp 2404-2407



Constant	Value
$K_J = 2e/h$	483 597.892(21) GHz/V
$m_a$	$9.109\ 38211(80) \times 10^{-31}$ kg
$m_D$	$1.672\ 621\ 62(15) \times 10^{-27}$ kg
$N_A$	$6.022\ 141\ 84(52) \times 10^{23}$ mole <sup>-1</sup>
$e$	$1.602\ 176\ 48(7) \times 10^{-19}$ C

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu

Beyrouth 2005

## Dimensions

- Tension et résistance
- Rapport masse utile/masse morte
- Raccordement masse
- Bruits mécaniques

Induction	1 T
$\Phi$ bobine	250 mm
Nb de tours	630
Masse étalon	250 g, <b>500 g</b> , 1 kg
Courant	5 mA
Résistance	200 $\Omega$
Tension	1V
Vitesse	2 mm/s
Déplacement	40 mm

Balance du Watt : un système mécatronique complexe - Suat Topcu

Beyrouth 2005