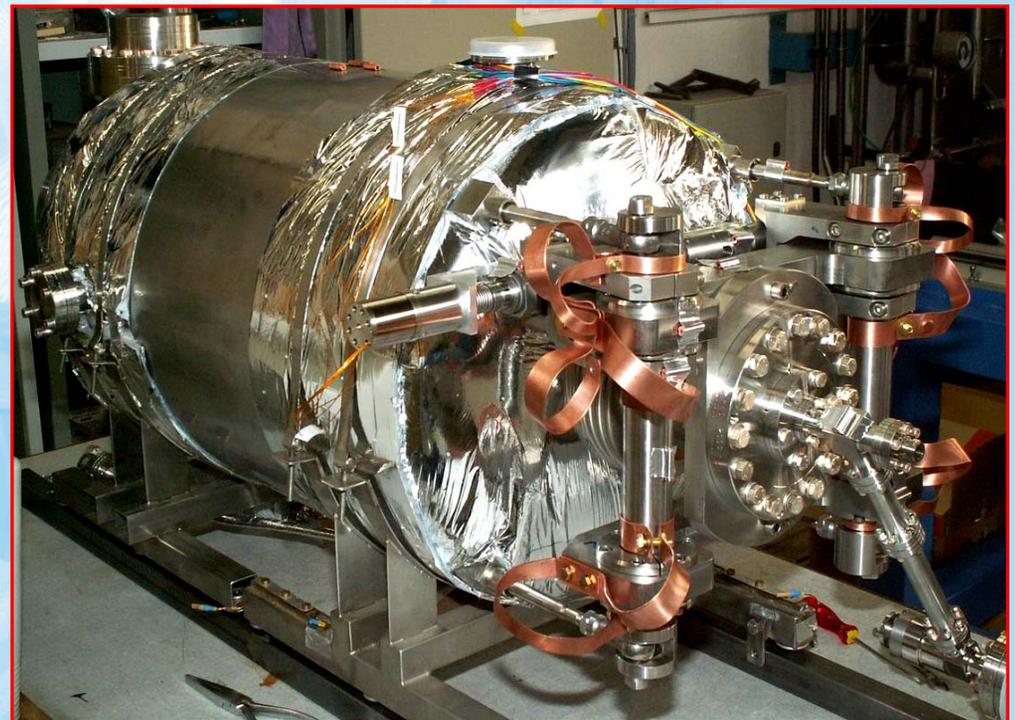
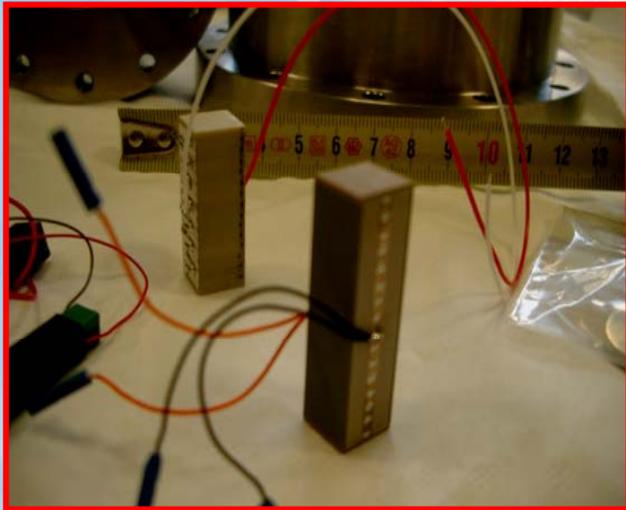




APPLICATION DES ACTIONNEURS PIEZOELECTRIQUES AUX SYSTEMES D'ACCORD A FROID RAPIDES DES CAVITES SUPRACONDUCTRICES



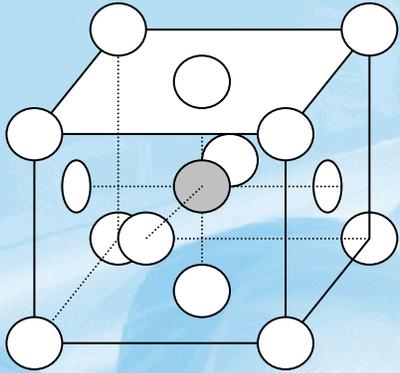
- **Bref historique sur les matériaux piézoélectriques**
- **Notions fondamentales de piézoélectricité**
- **Avantages des actionneurs piézoélectriques**
- **Procédés de fabrication**
- **Définitions fondamentales et propriétés fonctionnelles**
- **Exemples d'application**
- **Pourquoi doit-on réguler la fréquence des cavités supraconductrices ?**
- **Caractérisation des actionneurs piézoélectriques à basse température**
- **Les systèmes d'accord à froid rapides**
- **Résultats récents sur cavités**
- **Conclusion et perspectives**

Bref historique

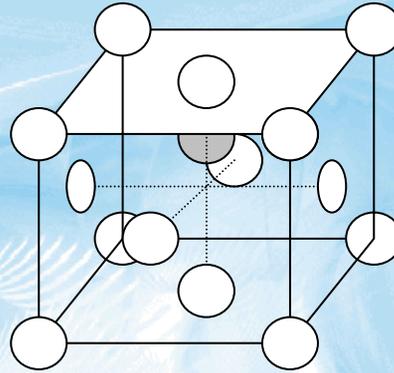
- En Grec **piezô**  **comprimer**
- Effet **piézoélectrique direct** observé dans **certains cristaux naturels ou synthétiques (céramiques)**
 - ➔ Phénomène découvert par Pierre et Jacques Curie qui ont testé un **crystal de tourmaline**
 - ➔ Application d'une **contrainte mécanique** suivant certains **axes cristallographiques**  apparition d'une **tension électrique** entre les deux faces sollicitées.
- **Théorie de Lippmann** et vérification expérimentale par Pierre Curie
- Effet **piézoélectrique inverse**:
 - ➔ Tension électrique  dilatation ou contraction dans la direction du champ électrique appliqué
- **Loi de Curie** "Un cristal qui possède un centre de symétrie ne peut être piézoélectrique"
- 1922: Langevin fabrique le premier capteur piézoélectrique

Notions fondamentales de piézoélectricité 1

Piézoélectriques = céramiques ferroélectriques polarisées

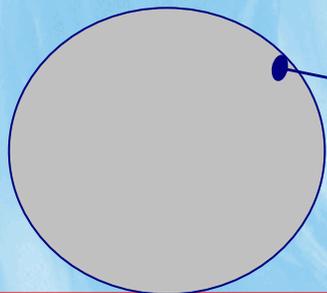


Avant polarisation
CFC, isotrope



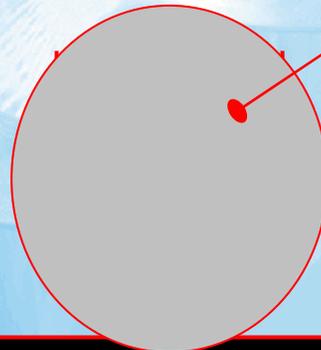
Après polarisation
tétragonale et anisotrope

Champ électrique intense $E \rightarrow$ polarisation rémanente dans la direction du champ



Dipôles:
orientation
aléatoire

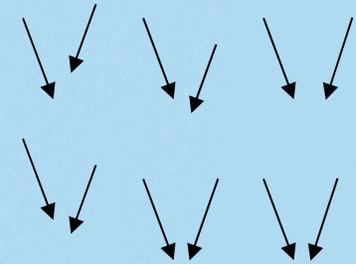
Céramique non
polarisée



Domaine
de Weiss

E

Durant la
polarisation



Après
polarisation

Céramiques = oxydes
Diélectrique = isolant
Potentiel en un point

\vec{R}

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{|\vec{r}_i - \vec{R}|}$$

A grande distance ($R \gg r_i$), l'expression précédente peut se simplifier :

$$(4\pi\epsilon_0) \cdot \delta V \cong \frac{\sum_i q_i}{R} + \frac{\left(\sum_i q_i \vec{r}_i \right) \cdot \vec{R}}{R^3}$$

Chaque région étant **électriquement neutre**, la contribution principale est dipolaire. **La polarisation \vec{P} est le moment dipolaire par unité de volume:**

$$\vec{P} = \sum_i q_i \vec{r}_i$$

Matériau pyroélectrique matériau ayant une polarisation spontanée qui varie avec la température

Coefficient pyroélectrique

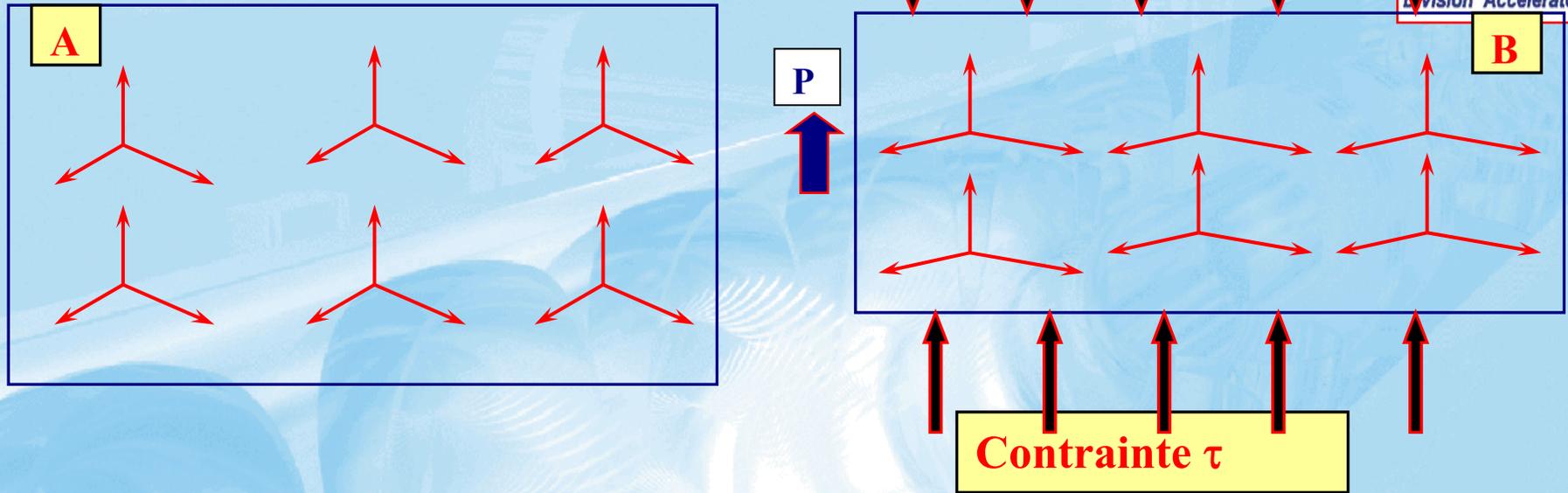
$$p = \frac{\partial P}{\partial T}$$

Matériau ferroélectrique est un matériau pyroélectrique dont la polarisation spontanée peut être réorientée par application d'un champ électrique.

Coefficient pyroélectrique de **matériaux piézoélectriques**

Matériau	p (10 ⁻⁶ C/(m ² .K))
Tourmaline	4
Céramique PZT	380

Notions fondamentales de piézoélectricité 4



A) Au repos le cristal a une symétrie d'ordre 3, la somme des trois moments dipolaires est nulle

B) Sous contrainte, cette somme n'est plus nulle : polarisation du cristal

Relations fondamentales

$$P = \tau \cdot d + E \cdot \epsilon_0 \cdot \chi$$

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\tau}{E_Y} + E \cdot d$$

**d: Coefficient piézoélectrique, L: Longueur, E_Y : module de Young
E: champ électrique, χ : susceptibilité**

- **Résolution infinie**

- Actionneurs piézoélectriques: **conversion directe** énergie électrique en énergie mécanique.

- Déplacements **sub-nanométriques**

- Ni pièces en mouvement, ni mécanismes, ni liaisons  **très haute résolution**

- **Rapidité**

- Actionneurs piézoélectriques réagissent à l'échelle de la **microseconde**.

Supportent de fortes accélération :>10000 g

- **Génération de forces élevées**

- Actionneurs piézoélectriques pour fortes charges > **plusieurs tonnes!**

- Amplitudes >100 μm avec résolution sub-nanométrique

- **Pas de champ magnétique**

- L'effet piézoélectrique **n'est sensible qu'au champ électrique!**

- **Faible consommation**
 - Actionneurs piézoélectriques = Capacité
 - Très faible consommation en fonctionnement statique même pour maintenir ou supporter de fortes charges
 - En statique: pas de pertes
- **Ni friction, ni usure Faible maintenance**
 - Tests d'endurance: pas de dégradation de performance après plusieurs milliards de cycles!
- **Compatibilité ultravide, salle blanche**
- **Fonctionnement aux températures cryogéniques ($T < 100\text{K}$)**
- **Tenue aux rayonnements (neutrons rapides, X et rayons gamma)**

→ La majeure partie des éléments **piézoélectriques** industriels sont à base de **Plombate Zirconate Titanate (PZT)**

Actionneurs piézoélectriques multicouches (multilayer piezostacks)

- 1- Mélange et broyage du matériau brut
- 2- Préparation d'une pâte,
- 3- Moulage: couches **d'épaisseur $e = 20 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$**
- 4- Dépôt des électrodes métalliques et laminage
- 5- Pressage et compactage pour augmenter la densité de la céramique et éliminer l'air piégé entre les couches
- 6- Chauffage à **$750 \text{ }^\circ\text{C}$** pour éliminer le liant
- 7- Frittage à **$\Theta < 1100 \text{ }^\circ\text{C}$**
- 8- Câblage puis polarisation (**$E \sim \text{qq MV/m}$**)

Actionneurs piézoélectriques haute tension

- 1- Mélange et broyage du matériau brut
- 2- Chauffage à $T \cong 0.75 T_{\text{frittage}}$ pour augmenter la vitesse de réaction $v \sim \exp(-DH/RT)$ et broyage
- 3- Deuxième broyage et mélange de la poudre calcinée pour augmenter la réactivité
- 4- Mise en forme et pressage de la céramique verte
- 5- Chauffage à $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour éliminer le liant
- 6- Frittage à $\Theta = 1250\text{ }^{\circ}\text{C} - 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 7- Découpe, polissage, et nettoyage pour avoir la forme et les dimensions souhaitées
- 8- Dépôt des électrodes métalliques par sputtering (**Platine ou palladium**)
- 9- Polarisation ($E \sim qq\text{ MV/m}$) dans un bain d'huile

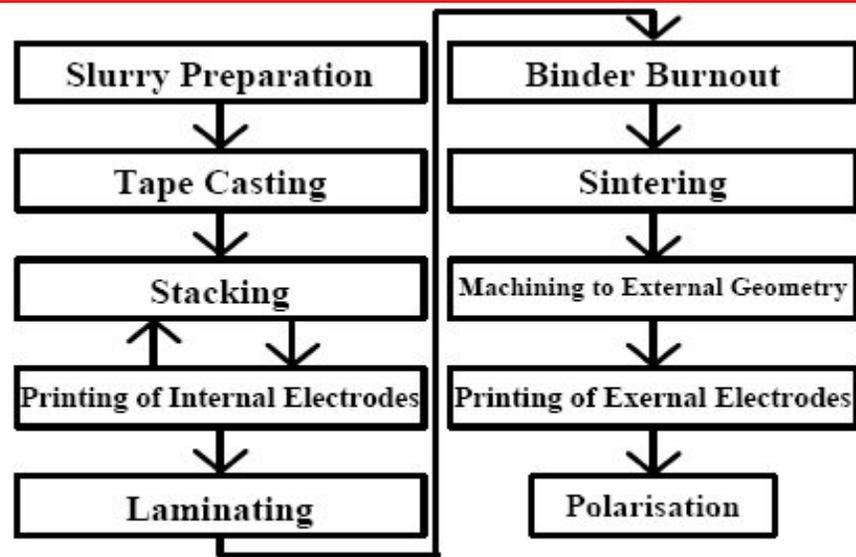
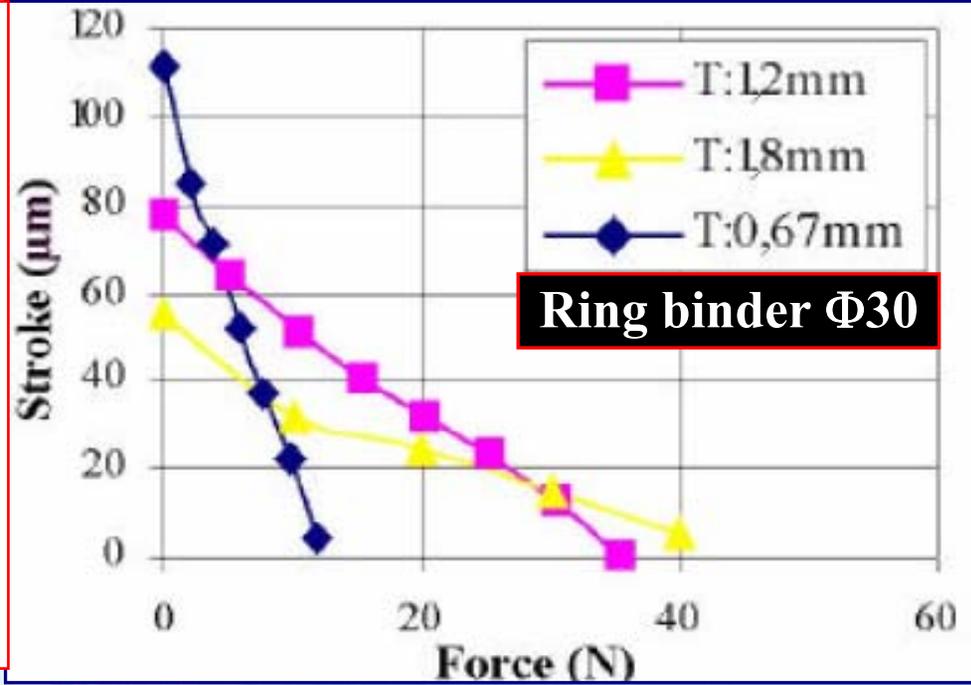
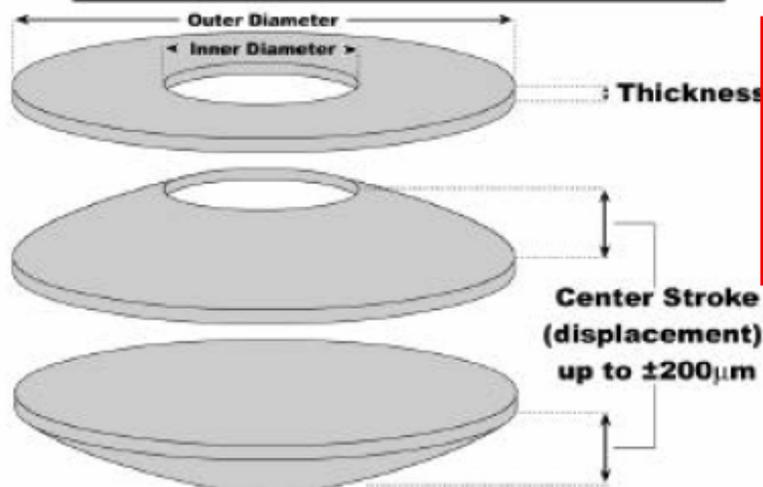


Figure 5: Schematic presentation of the process used for production of Ceramic Multi-layer Bending Rings.

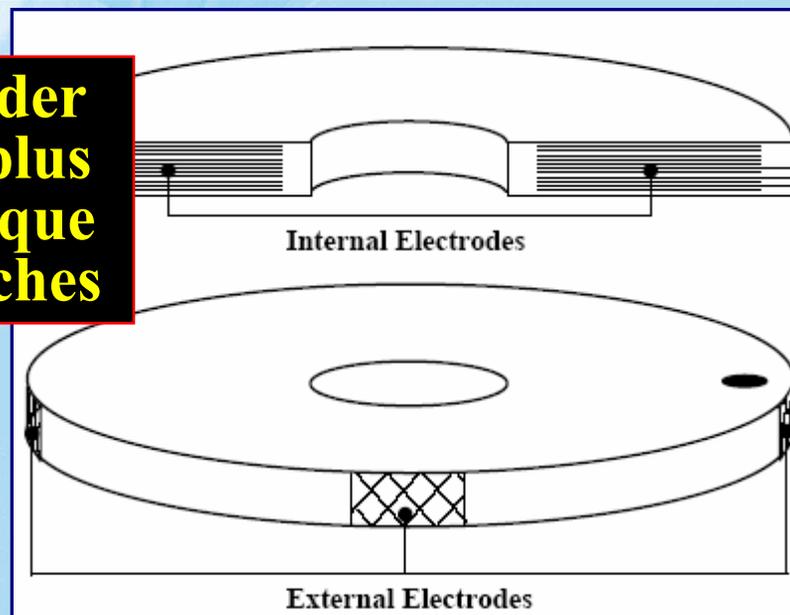


Ring binder Ø30

Noliac CMB-R Ring Bender



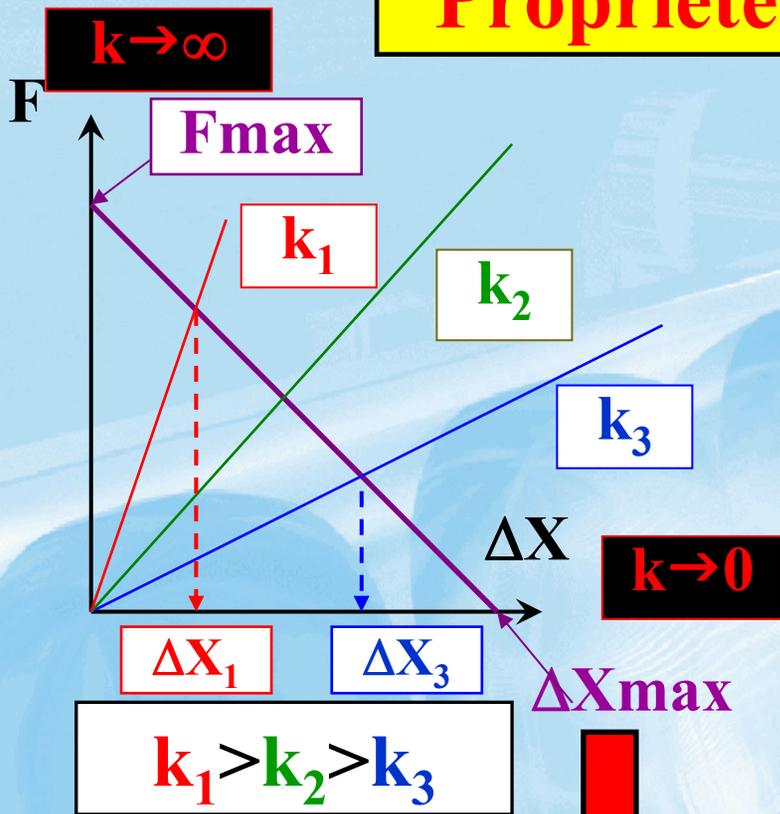
**Ring binder
~25 fois plus compact que multicouches**



Principe de fonctionnement

- Céramiques piézoélectriques PZT: anisotropes effet piézoélectrique dépend de la direction
- Principales directions : $X, Y, Z = 1, 2, 3$ $\theta_X, \theta_Y, \theta_Z = 4, 5, 6$
 - ➔ Axe 3: direction de polarisation
- d_{ij} [m/V]: **Taux de déformation** (m/m) par unité de champ électrique [V/m]
i: direction du champ (Excitation) , **j: direction du déplacement** (Réponse)
- g_{ij} [Vm/N]: coefficients de tension. Rapport du champ électrique de court-circuit [V/m] à la contrainte mécanique appliquée [N/m²]
- k_{ij} [adimensionnel]: Coefficients de couplage : rapports traduisant la conversion d'énergie mécanique électrique.
➔ Les coefficients **dépendent de la température, la pression, le champ électrique, la forme, les conditions aux limites mécaniques et électriques.**

Propriétés fonctionnelles 1

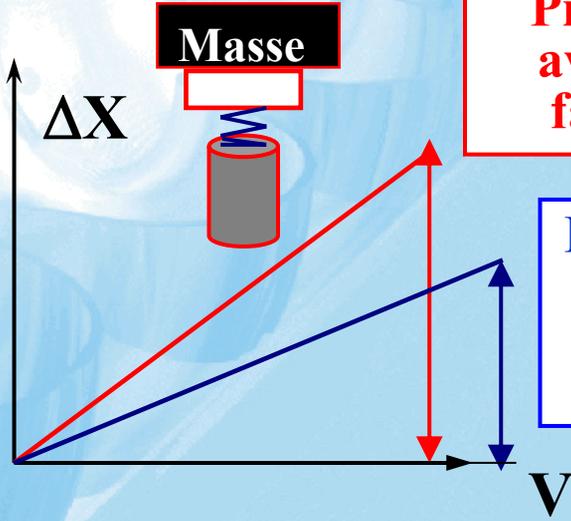


k_i : rigidité du système à déplacer

F_{max} : Force en mode bloqué
 ΔX_{max} : Déplacement libre
 k_p : Rigidité du piézo

$F_{max} = k_p \cdot \Delta X_{max}$

Piézoélectrique avec système à faible rigidité



Piézoélectrique avec système à rigidité non négligeable!

$$\Delta X_{max,j} = \frac{k_p}{k_i + k_p} \Delta X_{max,0}$$

$k_i \ll k_p \quad \Delta X_{max,i} = \Delta X_{max,0} \text{ et } F_{max} \approx 0$
 $k_i \gg k_p \quad \Delta X_{max,i} = 0 \text{ et } F_{max} \approx F_{max,0}$

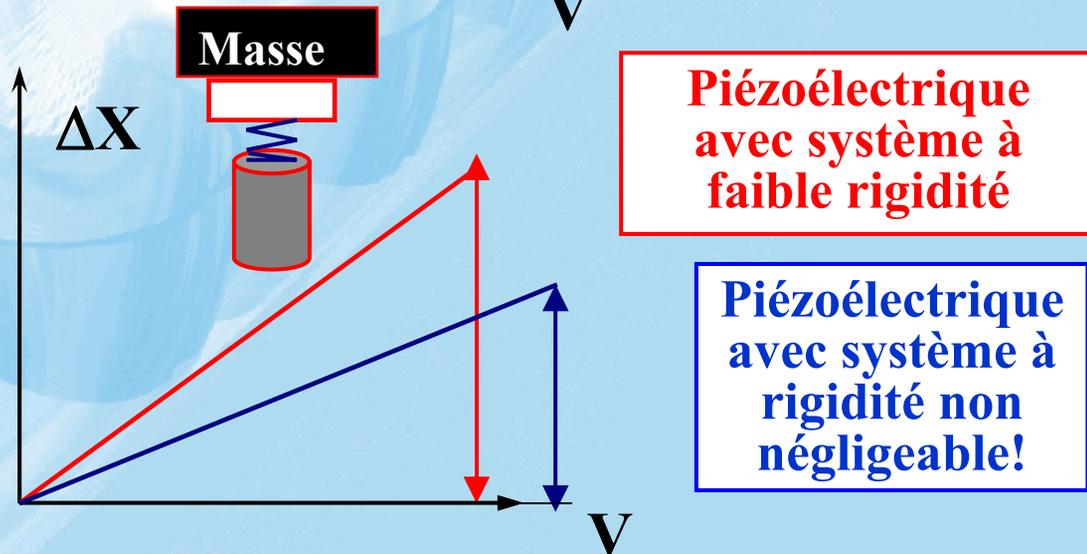
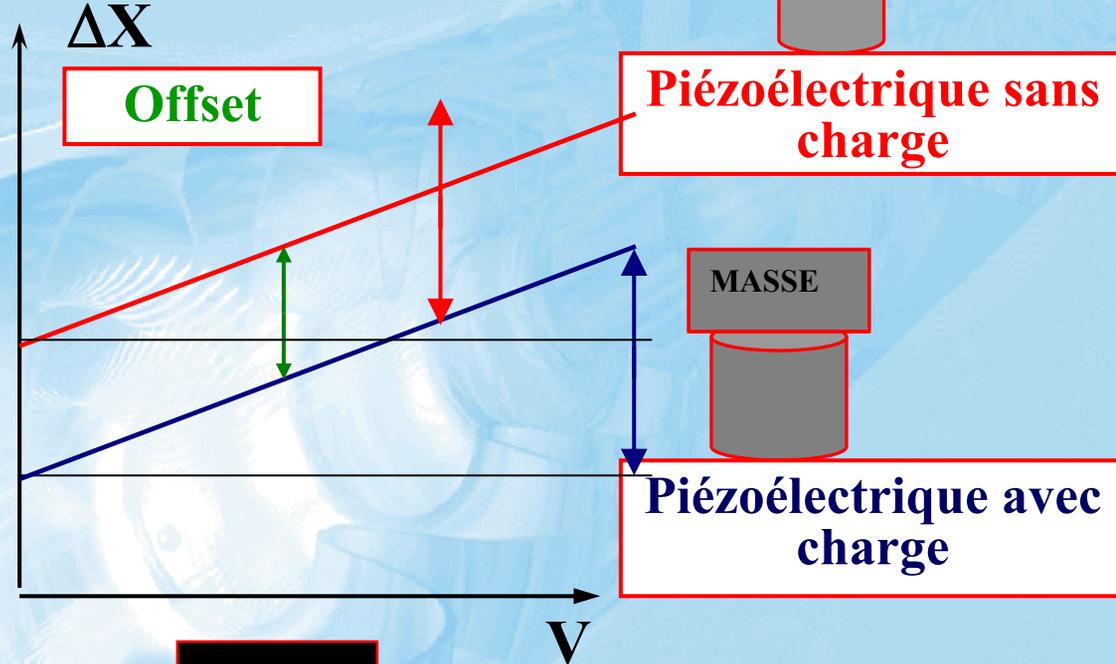
Propriétés fonctionnelles 2

→ Une **charge** a pour effet de **déplacer la plage de fonctionnement**

→ **Déplacement nominal inchangé**

→ **Couplage à une masse via une rigidité non négligeable**

⇒ **Diminution du déplacement nominal**



Propriétés fonctionnelles 3

Tension (V)

Cycle en papillon

Zone utile
 $V > V_P$

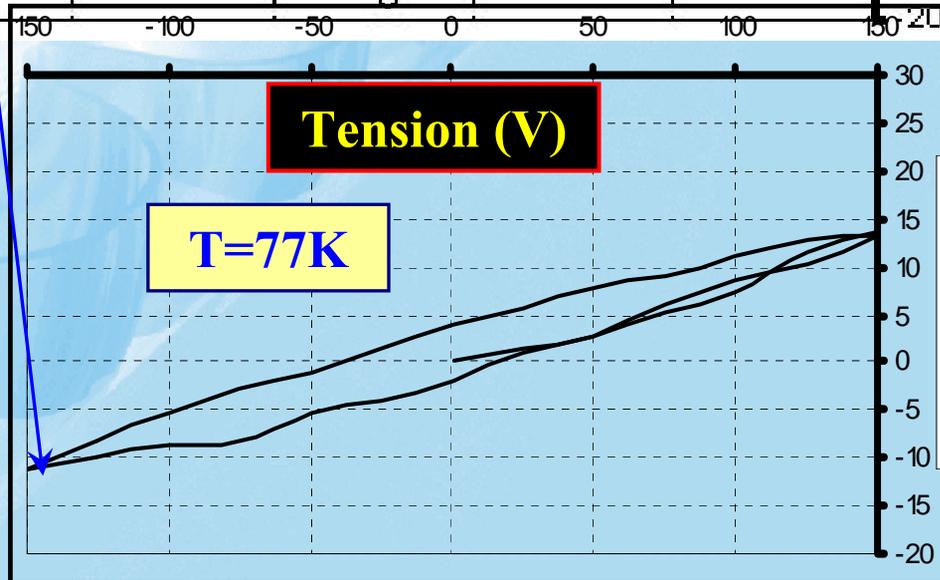
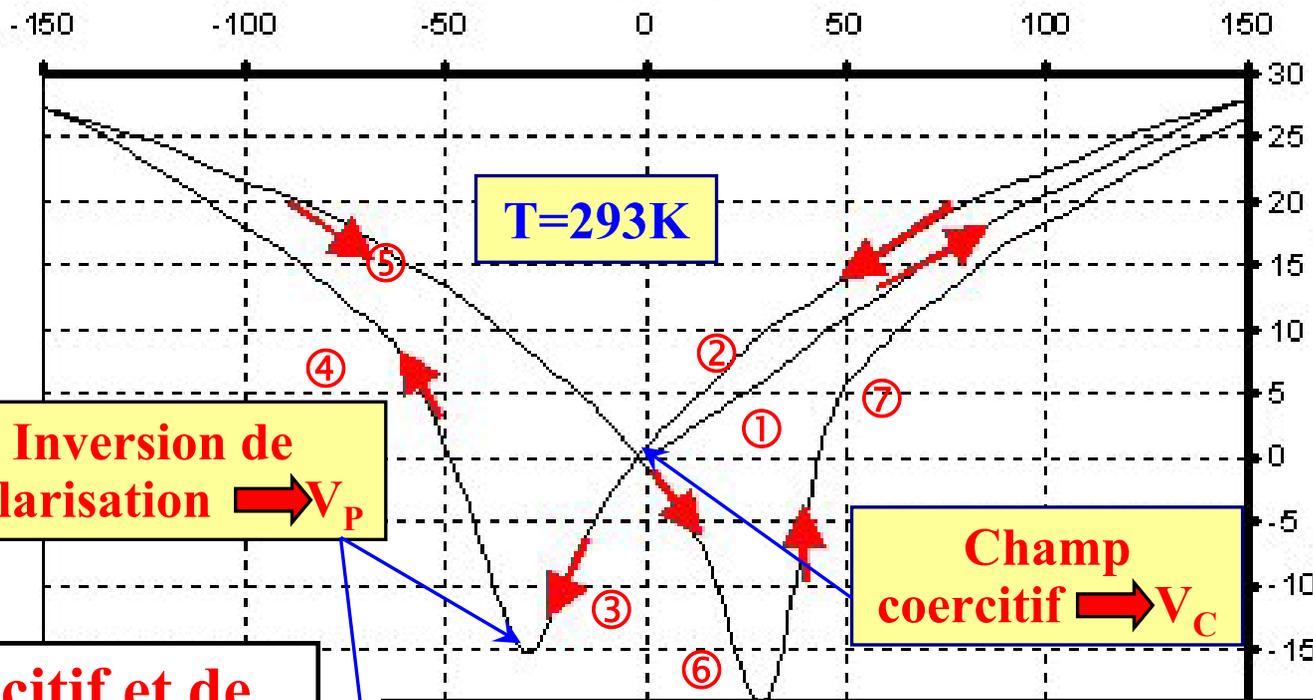
Inversion de polarisation $\rightarrow V_P$

Champ coercitif $\rightarrow V_C$

Les champ coercitif et de dépolarisation décroissent avec la température

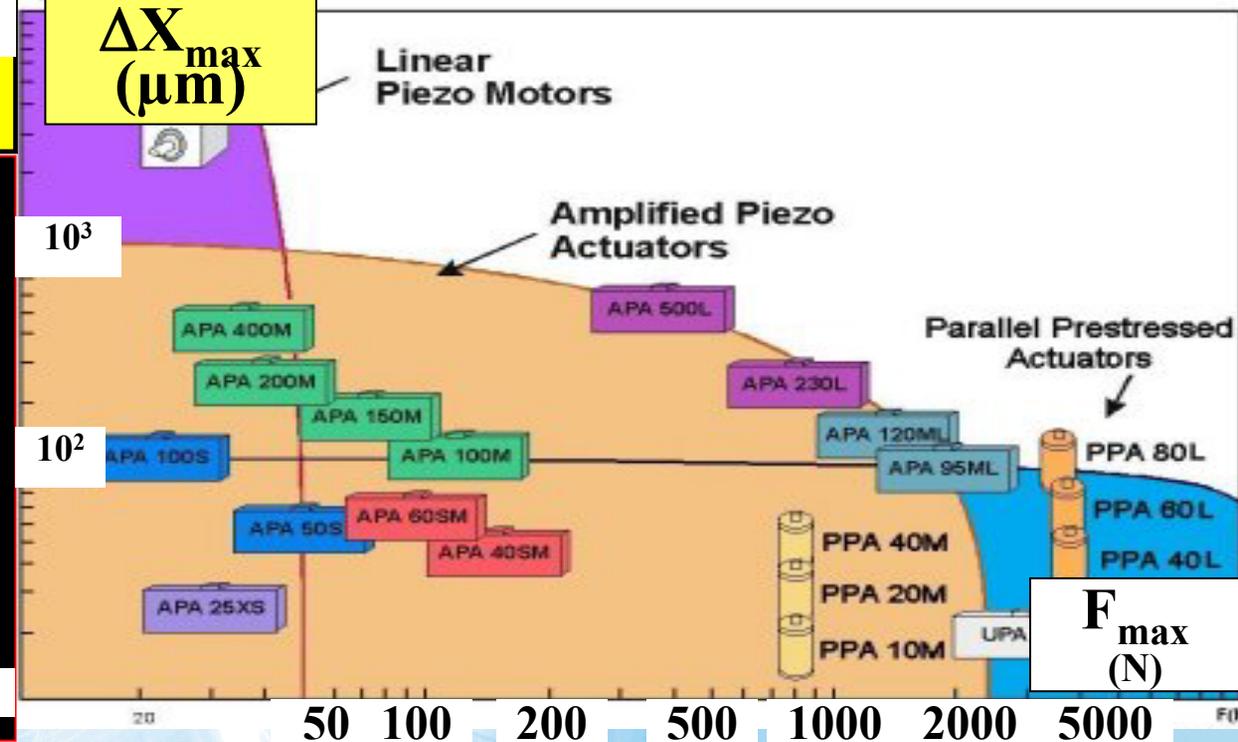


Fonctionnement bipolaire: compensation de la diminution du déplacement



Déplacement (μm)

Gamme des actionneurs CEDRAT



- Grands déplacements par unite de longueur
- Haute densité d'énergie mécanique par unité de volume ou de masse
- Grande rigidité et densité de force
- Basse tension, faible consommation
- Temps de réponse très court

- PPA: Parallel Pre-stressed Actuators (PPAs) DPA (Direct Piezo Actuators)
- APA : Amplified Piezo Actuators (APAs)
- DPA, PPA et APA → Déplacements proportionnels à la tension appliquée
- DPA et PPA génèrent des Force très importantes (~qq kN)
- APA : génèrent à la fois des grands déplacements par unité de longueur (~100 μm/cm ou 1%) et des force très importantes
- Ultrasonic Piezo Actuators (UPAs) similaires aux APA mais fréquence de résonance ultrasonique et grandes vitesses de vibration (m/s) à faible tension (10V AC). Générateurs ultrasonores.
- Linear Piezo Motors (LPMs) moteurs ultrasonores basse tension → Micro-positionnement avec grands déplacements (>100 mm) et haute stabilité à une position donnée.

Caractéristiques électromécaniques d'actionneurs piézoélectriques

Fournisseur	EPCOS	NOLIAC	Piezo Mechanik	Physical Instruments	Piezosystem JENA
Paramètre (unité)					
Nom	PZT- Nd34	PZT pz27	PZT 5H	PZT 25	PZT
Longueur (mm)	30	30	55	35	42
Section (mm ²)	7x7	10x10	7.5x7.5	10x10	5x5
Module de Young (GPa)	51	45	55	37	50
Déplacement nominal à T~300K (μm)	40	42	60	35	40
Fréquence (kHz)	?	66	14	40	?
Rigidité (N/μm)	83	150	56	105	25
Force bloquée (kN)	3.2	6.3	4	3.6	1
Capacité @300 K (μF)	2.1	5.7	11	12.4	3.4
Tension max. (V)	160	200	150	120	150

Applications des actionneurs piézoélectriques

Loi de MOORE

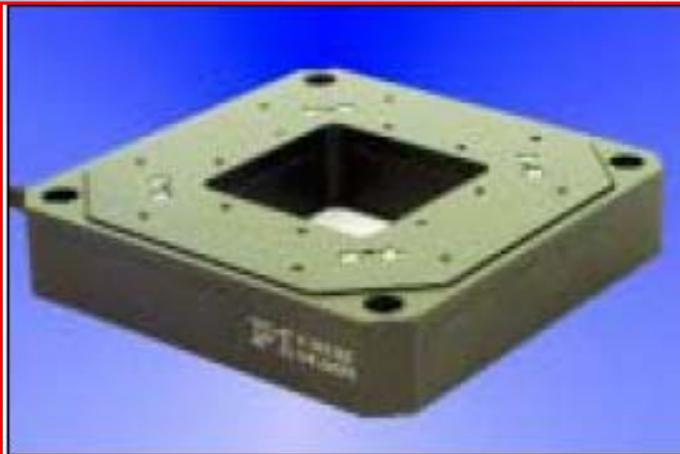
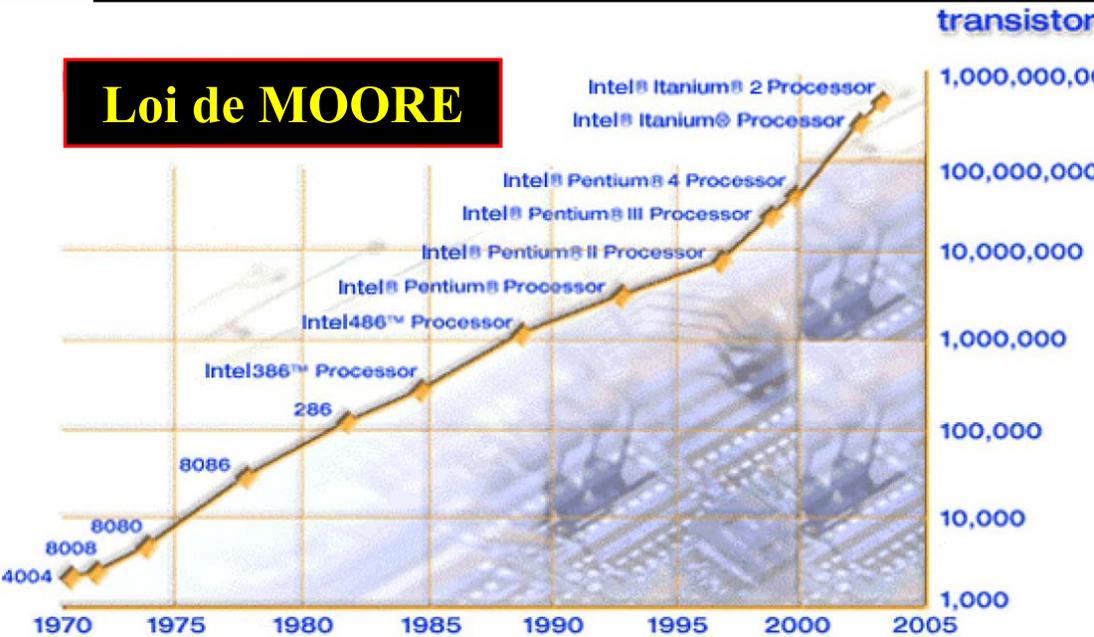


Fig. 1: A flexure-guided nanopositioning stage equipped with capacitive position sensors.

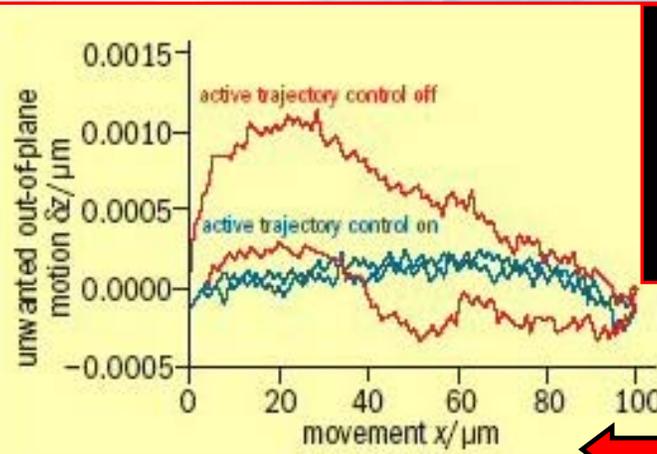


Fig. 2: Run-out of a flexure-guided nanopositioning system with and without active trajectory control.

Large gamme de géométrie, caractéristiques et performances

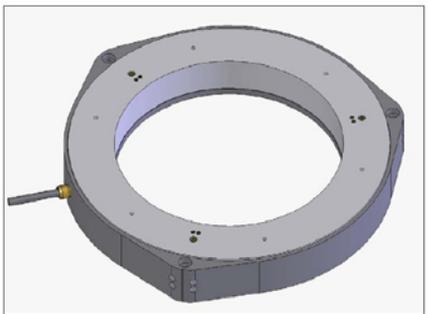
Déplacements microniques
Résolution nanométrique

● Mécanique de précision

- Déformation de structures
- Micro-pompes
- Positionnement d'outils
- Usinage de précision
- Compensation d'usure
- Actionnement de vanne aiguille
- Servomécanismes de machines rapides
- Contrôle des couteaux des outils d'extrusion
- Amortissement actif des vibrations
- Génération d'ondes de choc

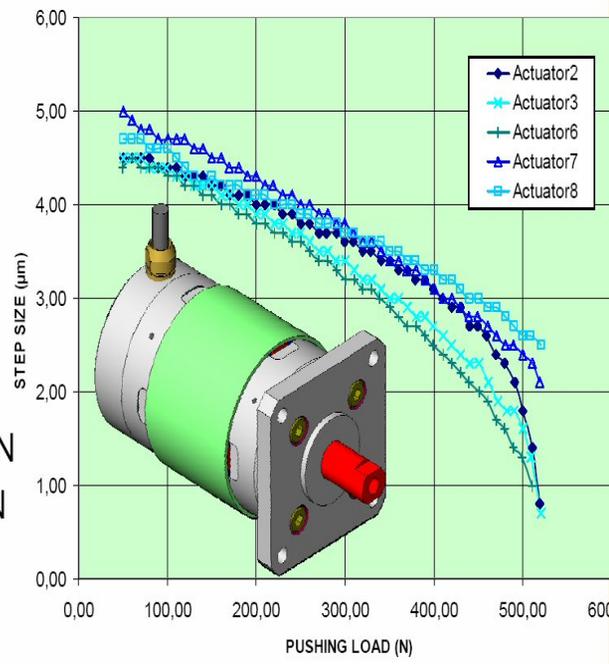
High Load Z-Tip/Tilt Wafer Stage

- Z-stroke: 1.3 mm
- Tip/Tilt: +/- 4mrad
- Max. Load >50 kg
- Closed loop with internal incremental sensor



N-215.00

- Stroke: 20 mm
- Continuous Analog Mode:
Resolution < 0.05 nm
Range: to 4 μm
- Step Mode:
Step size: 5nm - 8μm
- Blocking force: >500N
- Slipping force: >600N



● Stockage de données

- Test de disque
- Amortissement actif des vibrations
- Amortissement

● Semi-conducteurs et microélectronique

Nano&Microlithographie

- Nano-métrie
- Positionnement de masques et wafer
- Contrôle de dimensions critiques

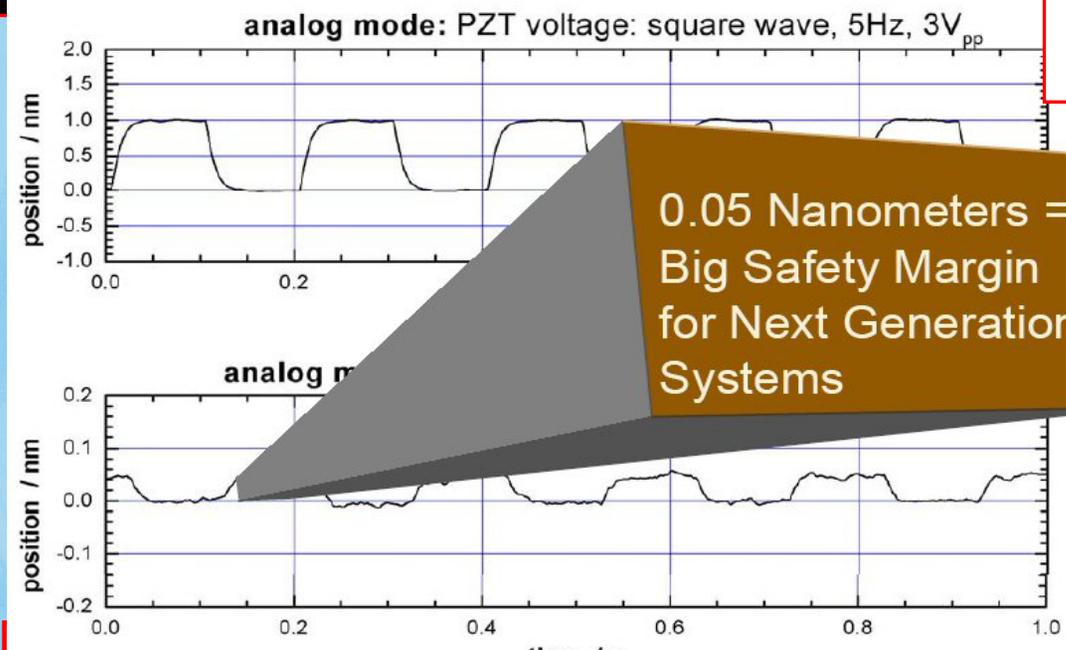


- **Optique, Photonique, Nano-métrie**
- **Miroirs**
- **Auto focus**
- **Interférométrie**
- **Optique Adaptative et active**
- **Accord de Laser**
- **Stimulation de vibrations**
- **Alignement et multiplexage de fibres optiques**
- **Stabilisation d'image, multipléxade de pixels**

De hautes performances



Des systèmes multi-axes



- **Sciences de la vie et médecine**
- **Microscopes électroniques à balayage**
- **Micro-pompes, micro-distributeurs**
- **Micromanipulation et Manipulation de gènes, cellules**

Compensation dynamique du décalage (Lorentz) en fréquence des cavités

- Champs électromagnétiques RF de surface \underline{H}_s and \underline{E}_s engendrent des forces de Lorentz pression de \underline{P} sur les parois de la cavité:

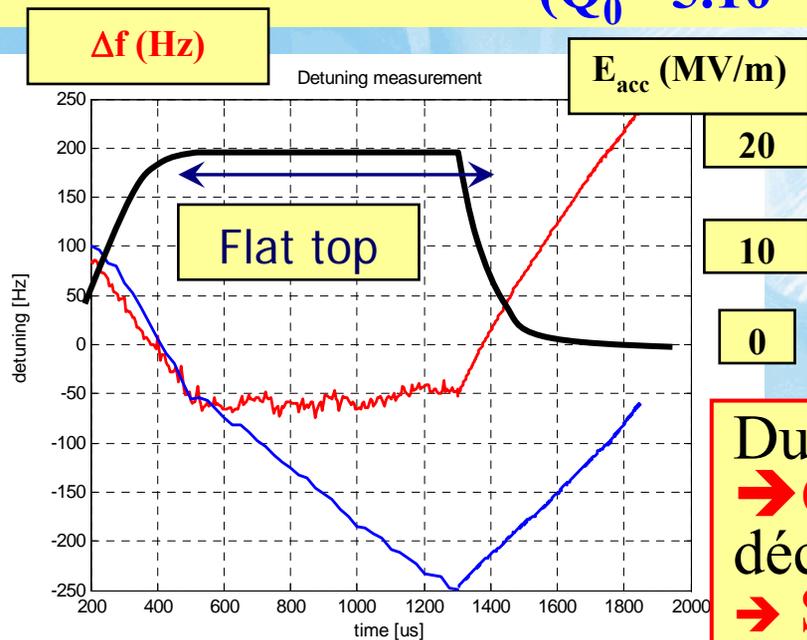
$$P = \frac{1}{4} \cdot (\mu_0 H_s^2 - \epsilon E_s^2) \quad (1)$$

$$P \prec E_{acc}^2 \quad (2)$$

$$\Delta f_L = -K_L \cdot E_{acc}^2 \quad (3)$$

Cavités TESLA : $P \approx$ qq kN/m² @ $E_{acc} = 25$ MV/m

Bande passante de la cavité équipée avec le coupler $\Delta f_{BW} = 425$ Hz
 ($Q_0 = 5 \cdot 10^9$, $Q_{ext} = 3.06 \cdot 10^6$).



TESLA SRF cavity (Nb, $f = 1300$ MHz, $L \sim 1$ m)



Durant le plat de champ pour $E_{acc} = 20$ MV/m
 → Compensation ($\sim 0.5 \mu\text{m}$) avec piezotuner, décalage ~ 30 Hz
 → Sans compensation décalage ~ 200 Hz

- **Caractérisation complète à basse température**
 - ➔ **Résumé des tests des différents types d'actionneurs piézoélectriques (JENA, PICMA et NOLIAC)**
- **Irradiations aux neutrons rapides à basse température**
- **Effet de la précontrainte sur le comportement aux températures cryogéniques**
 - ➔ **Dispositif expérimental**
 - ➔ **Effet d'une précontrainte axiale**
 - ➔ **Réponse transitoire à un échelon de précontrainte**
- **Status du programme expérimental à l'IPN Orsay**
- **Tests du SAFR de Saclay dans CRYHOLAB**
- **Conclusions et perspectives**

Vers capteur déplacement à 300 K

pompes

Membrane inox

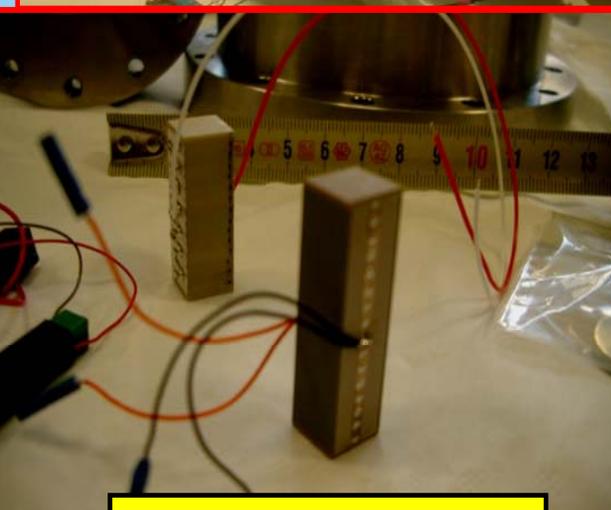
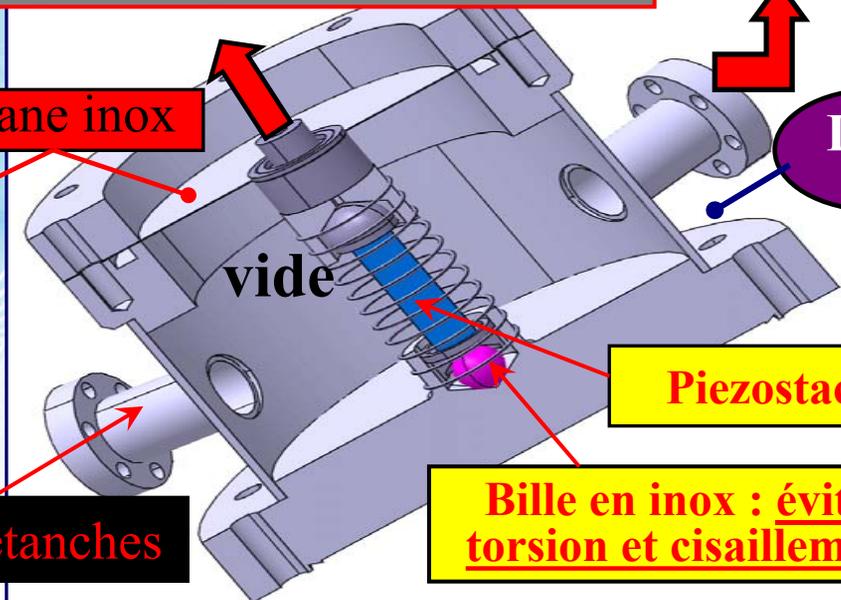
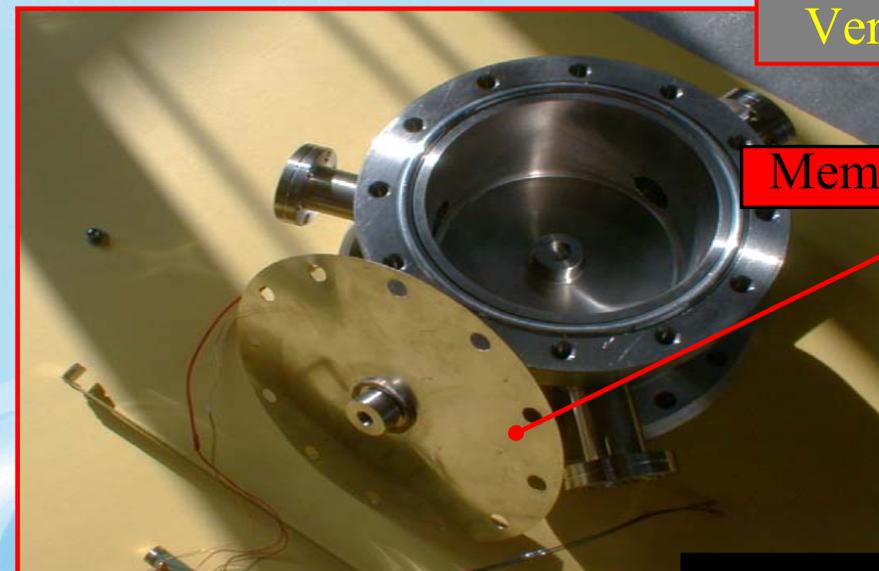
LHe

vide

Piezostacks

Passages étanches

Bille en inox : éviter torsion et cisaillement



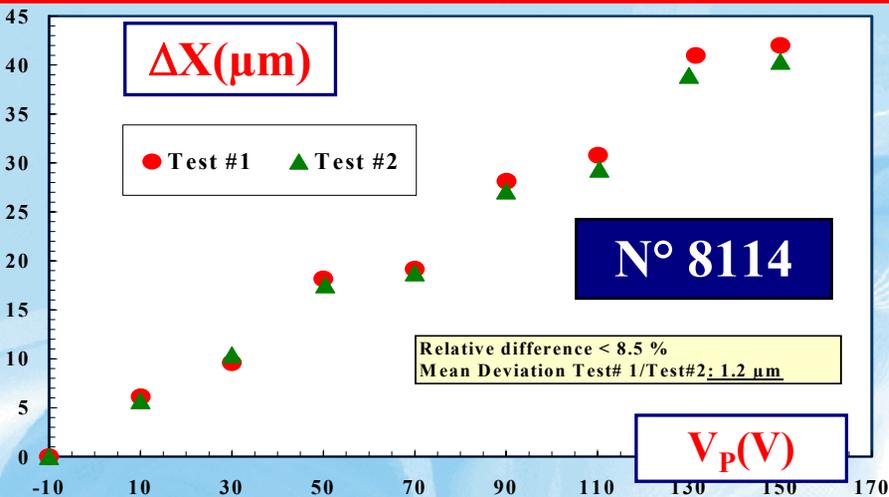
Actionneurs

• CARACTERISTIQUES

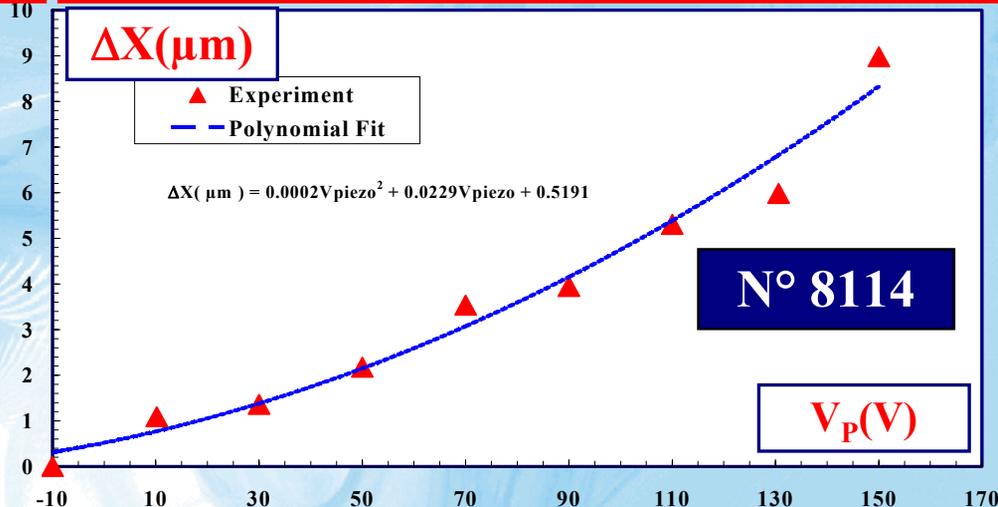
- **Temperature : 1.8 K – 300 K**
- **Etalonnage: Déplacement versus tension**
- **Propriétés diélectriques: C_p , R_p , Z , ϕ , $\text{tg}(\delta)$**
- **Echauffement dû aux pertes diélectriques**
- **Propriétés thermiques: résistance, chaleur spécifique**
- **Propriétés dynamiques**

Résultats sur les actionneurs JENA 1

Déplacement versus tension à T=295 K

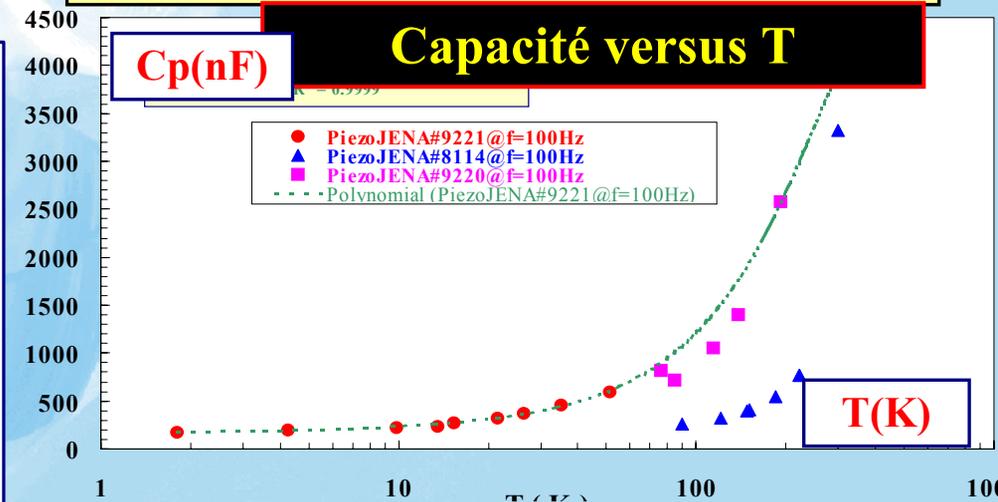
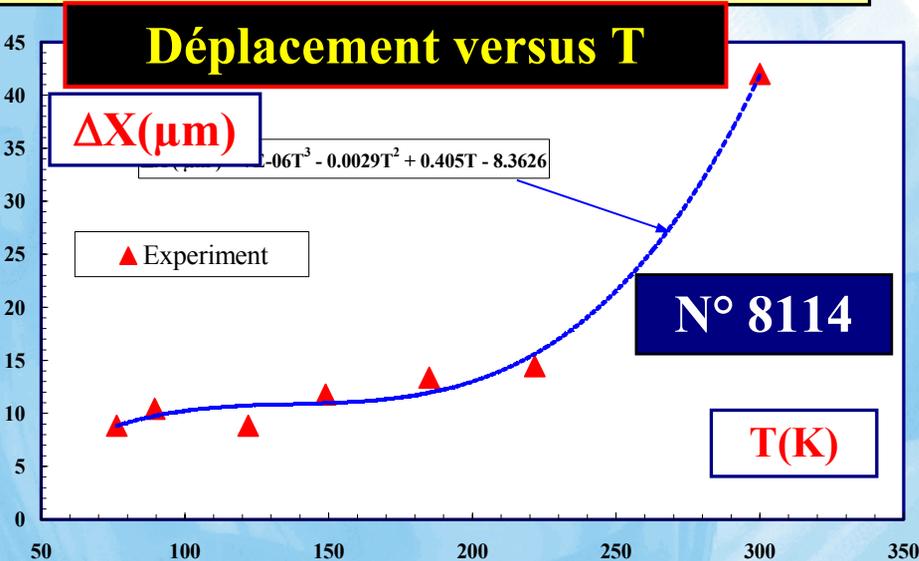


Déplacement versus tension à T=77 K



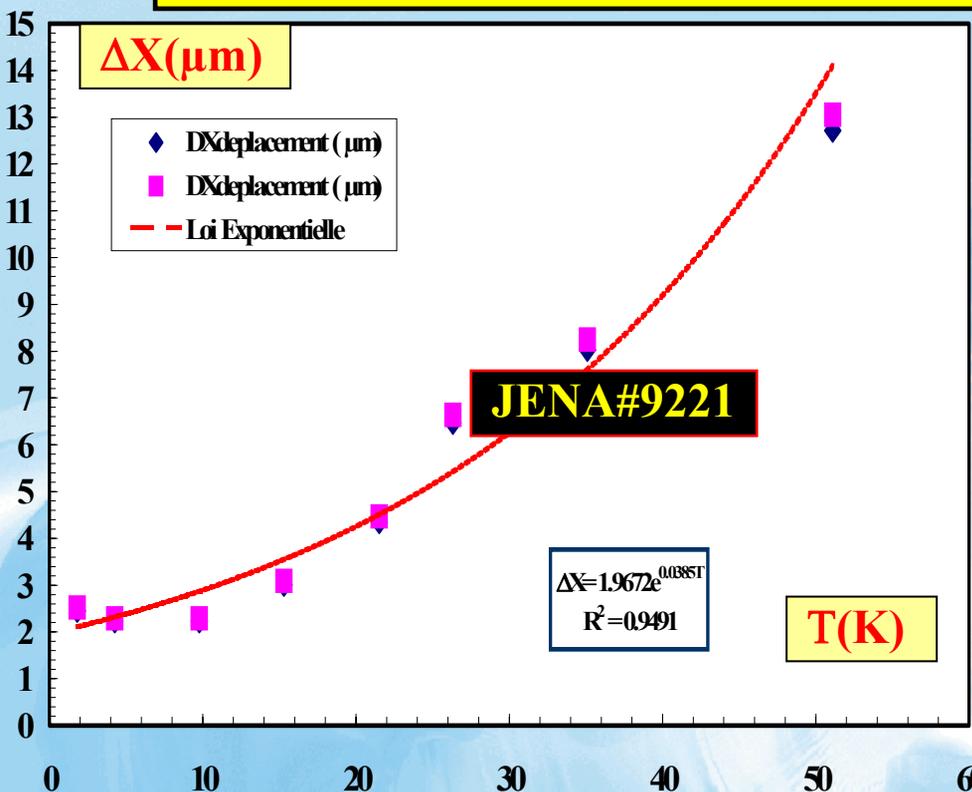
Répétabilité > 91.5% , Ecart: 1.2 μm

Déplacement réduit d'un facteur 4.7



Reproductibilité de fabrication!

Résultats sur les actionneurs JENA 2



**Déplacement nominal (Vmax=150 V)
versus temperature**

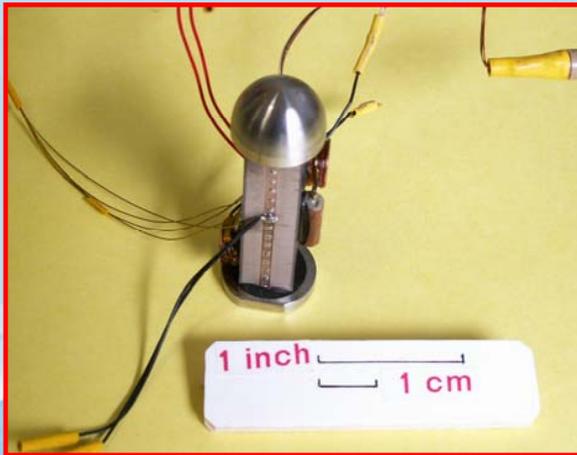
Plusieurs actionneurs piézoélectriques de type piezosystem JENA étudiés. Ne conviennent pas aux systèmes d'accord des cavités

- Déplacement Maximum < 3 μm à 2K
- Faible Force (bloquée) ~1kN@300K
- Faible rigidité: 25N/μm
- Mauvaise reproductibilité de fabrication d'un lot à l'autre
- Courte durée de vie à 2K (claquages électriques et/ou dommages mécaniques)



D'autres prototypes d'actionneurs de deux companies (PI and NOLIAC) ont été testés.

Actionneurs PICMA



Dimensions: 10 X 10 X 36 mm³

Déplacement Max.: 38 μm @ 120V (10%)

Capacité électrique: 12.4 μF

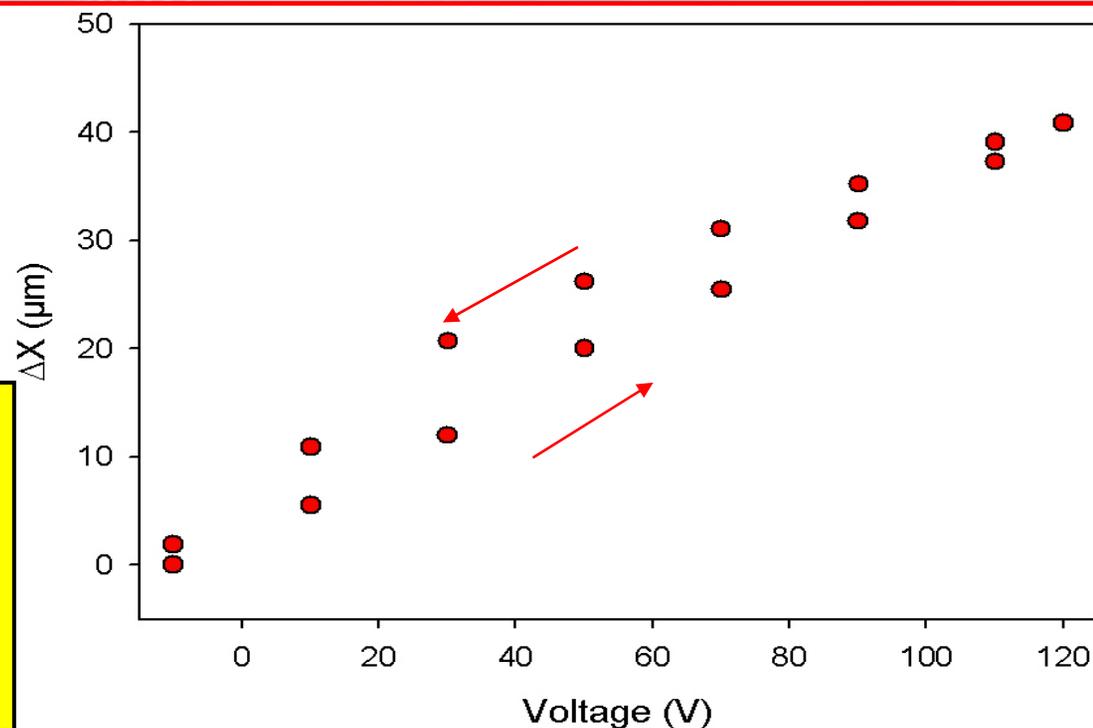
Force bloquée : 3600 N @ 120V

Rigidité : 105 N/μm

Fréquence de Résonance: 40 kHz

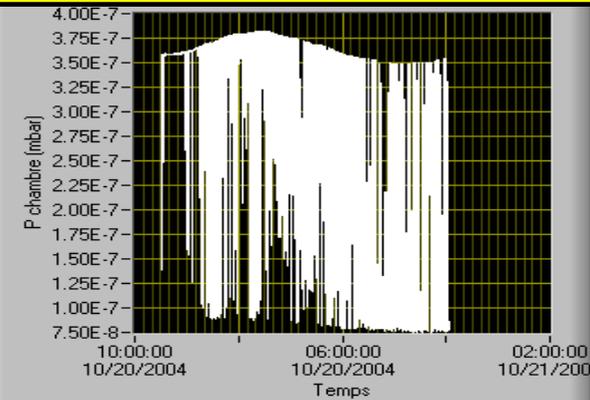
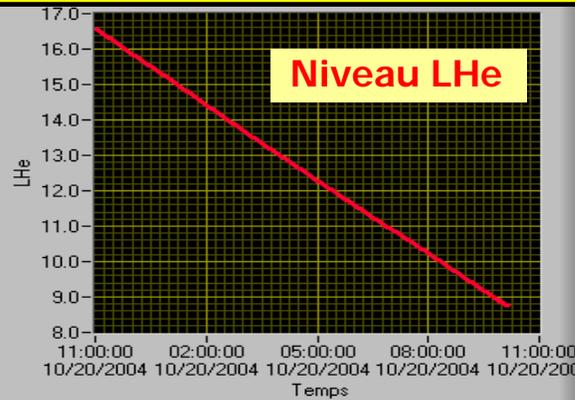
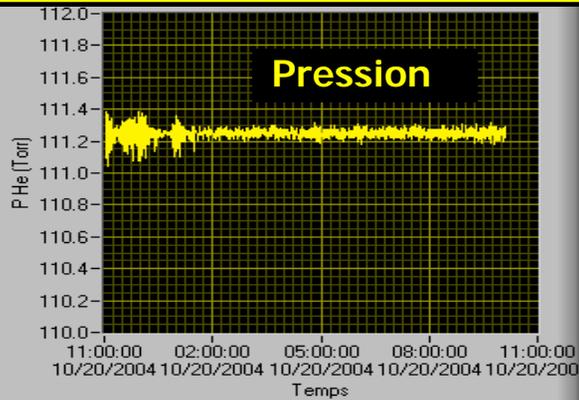
**Actionneurs muni d'une
chaufferette, d'un thermomètre
étalonné et jauge de contrainte**

**On observe clairement une
hystérésis sur la caractéristique
de l'actionneur à T=300 K. Cette
hystérésis est négligeable à
la température de l'hélium
liquide.**



Résultat d'étalonnage d'un actionneur PICMA à T=300 K

Test LHe à T=2.005 K- Actionneur PICMA #1

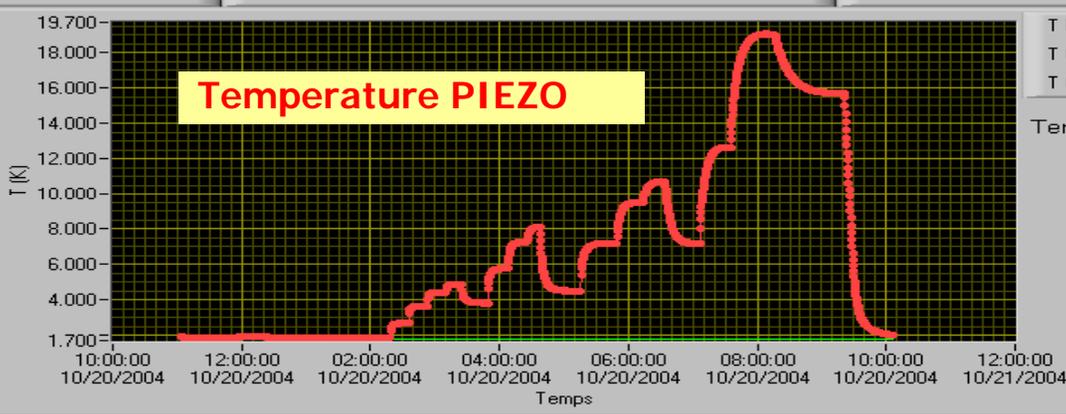


P He P He (Torr)
 PHe LHe
 111.22 8.76

paramètre 1:
 RLC → Cp
 Déplacement → V piézo
 Echauffement → Fréquence

paramètre 2:
 RLC → Dissipation
 Déplacement → V capteur
 Echauffement → dT

Paramètre1
 Courbe 0



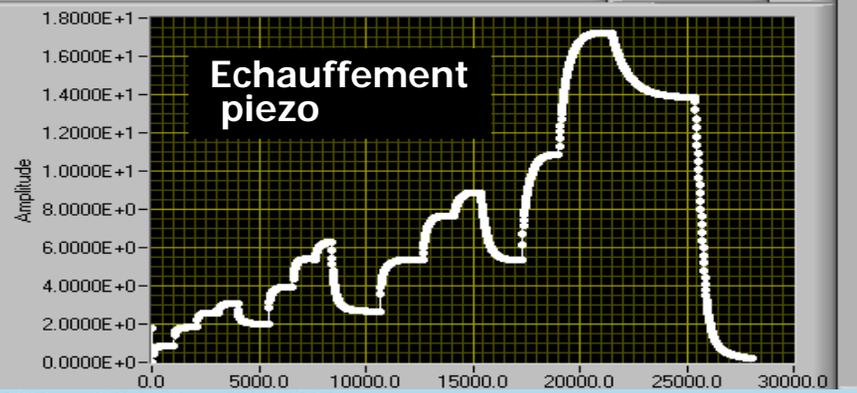
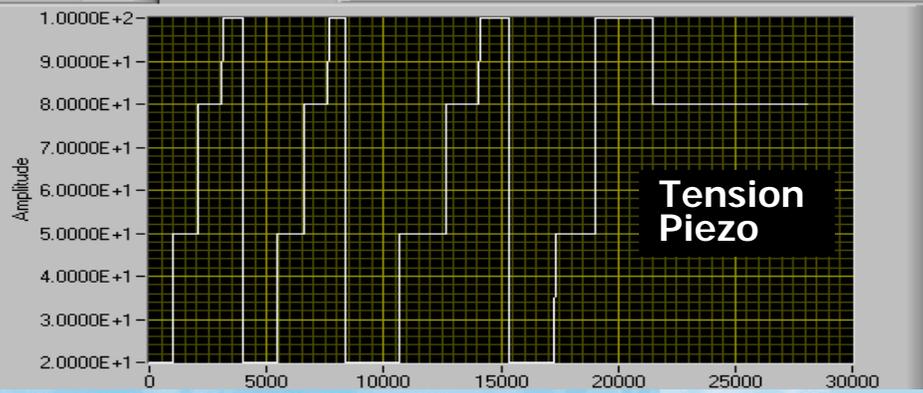
T Pt100
 T CX
 T GeC

Températures

P chambre
 P chambre
 P chambre
 7.8066E-8 mbar

T Pt100
 34.693
 T cernox
 2.005
 T GeC
 1.781

Paramètre2



Dissipation dans les actionneurs piézoélectriques

- **Pas de dissipation** en fonctionnement **statique**
- **Dissipation** en fonctionnement **dynamique** $V_p = f(\text{temps})$

Pertes diélectriques par unité de volume (W/m^3): $\sigma = \epsilon_0 \epsilon_r \pi E^2 \tan(\delta)$

Pertes diélectriques totales (W) : $P_{\text{diél}} = \pi f C_p V^2 \sin(\delta)$

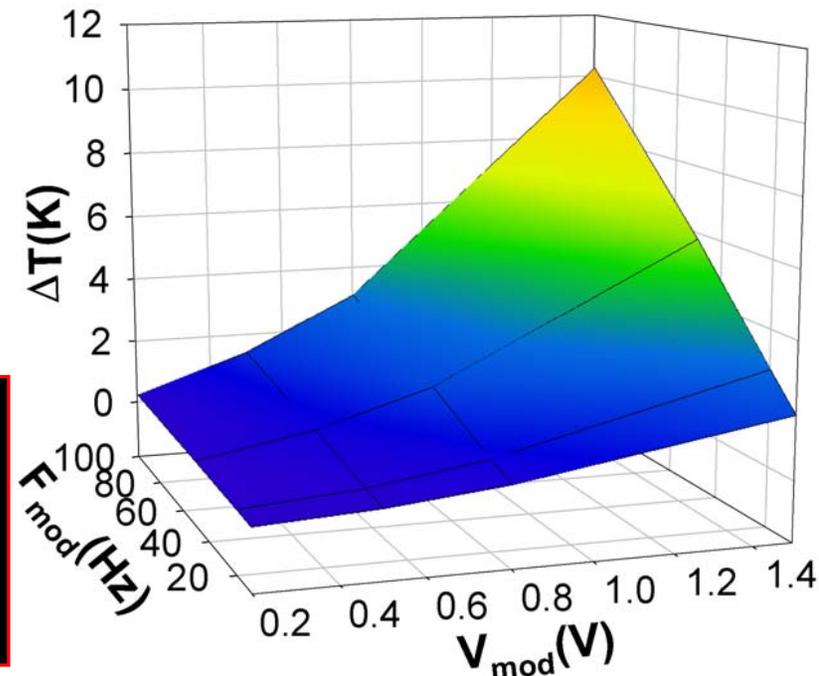
Capacité : $C = n \epsilon_0 \epsilon_r S / e$

Equation de la chaleur

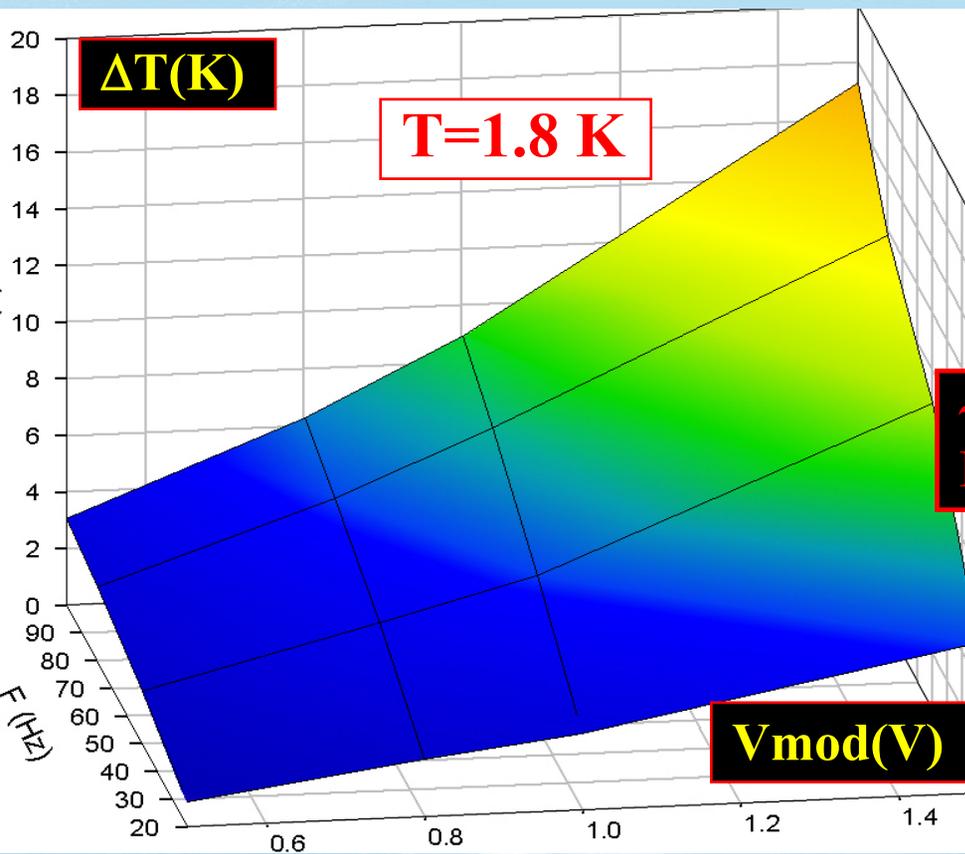
$$\Delta T + \sigma = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\alpha = k / \rho \cdot C_T$$

α : Diffusivité thermique
 k : Conductivité thermique
 ρ : masse volumique
 C_T : chaleur spécifique

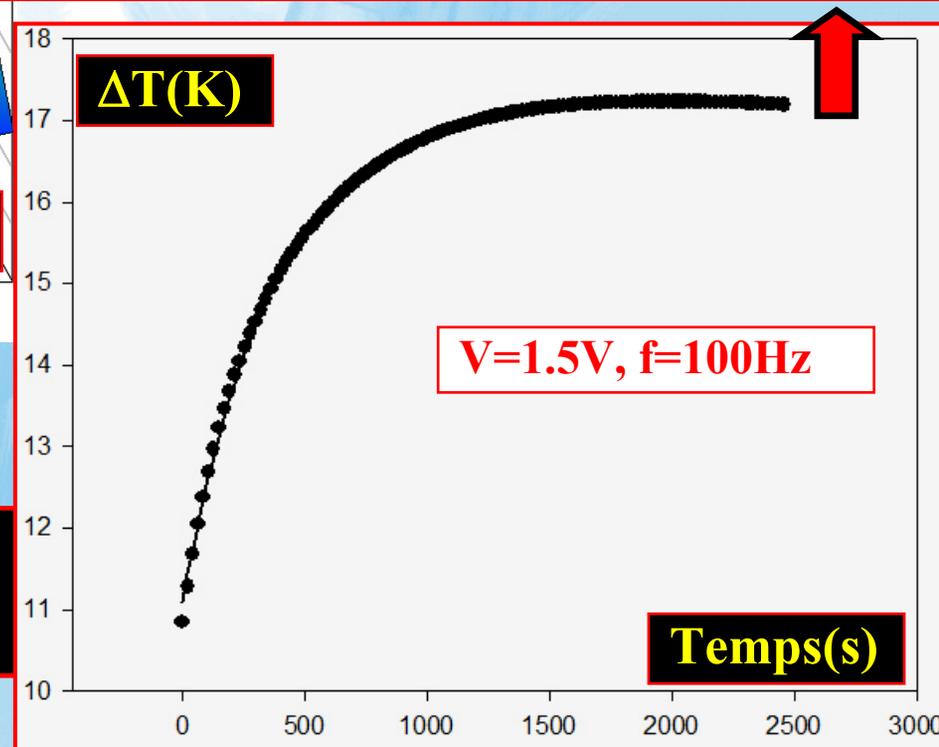


Echauffements dus aux pertes diélectriques



La constante de temps thermique τ et la chaleur spécifique C_0 se déduisent facilement de la courbe d'échauffement en fonction du temps $\Delta T(t)$, le vtime piézo étant soumis à une tension sinusoïdale!

$\tau = 375.5 s, mC_0 = \tau / R_{th} = 4.32 \cdot 10^{-4} J/K$
 Piézo de masse $m \sim 20g, C_0 \sim 0.02 J/Kg.K$

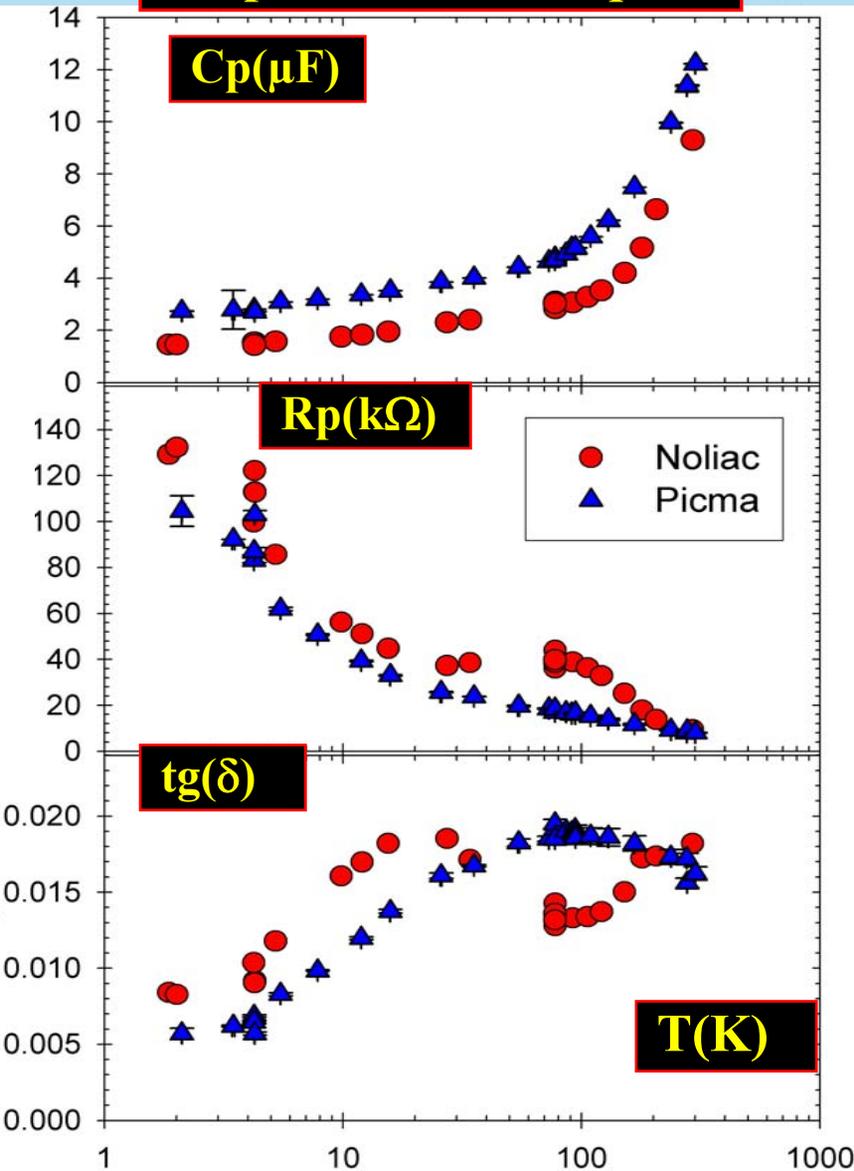


Pertes diélectriques: $P = \pi f C_p V^2 \sin(\delta)$
Résistance thermique: $R_{th} = \Delta T / P$

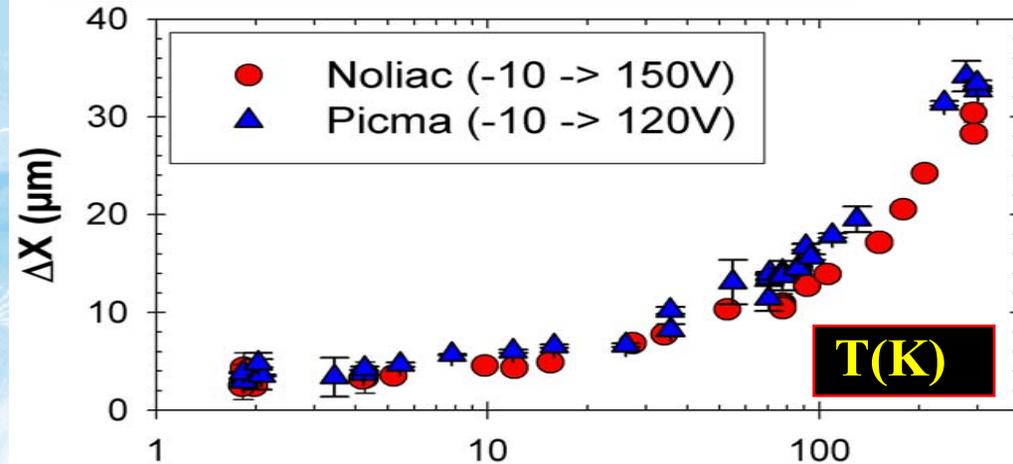
A $f_{mod} = 100Hz$:
 $\Delta V_{mod} = 3V \Leftrightarrow \Delta X = 167 nm \Leftrightarrow \Delta f_{cav} = 68Hz$
 $P = 20 \mu W \Leftrightarrow \Delta T = 17K \Rightarrow R_{th} \sim 9 \cdot 10^5 K/W$

Comparaison des actionneurs PICMA et NOLIAC

Propriétés diélectriques



Déplacement versus température



- 1) **Déplacement maximum à 1.8 K $> 3\mu\text{m}$**
Les deux actionneurs adaptés pour les cavités ILC: compensation dynamique d'un décalage $\sim 1\text{kHz}$ à $E_{\text{acc}} = 33\text{MV/m}$
- 2) **Pas de claquage ni d'endommagement observés pendant les tests**
→ **Durée de vie**
- 3) **Forte corrélation entre la capacité C_p et le déplacement maximum ΔX ($C_p \propto \Delta X$ pour $T < 50\text{ K}$)**
→ **Un moyen simple pour l'étalonnage d'un grand nombre d'actionneurs!**

IRRADIATIONS AUX NEUTRONS RAPIDES A BASSE TEMPERATURE

Division Accélérateurs

Objectif: Etude de l' effet des neutrons rapides sur les caractéristiques (performance, durée de vie,...) de différents actionneurs piézoélectriques à basse température

→ Station d' irradiation aux neutrons au Cycotron du CERI (Orléans)

● Faisceau de Deutons (Energie ≤ 25 MeV, Courant jusqu'à $35\mu\text{A}$)

→ Collision avec cible **béryllium** d'épaisseur 3 mm et refroidie (eau)

→ Production d'un haut flux de **neutrons flux avec une faible dose γ ($<20\%$)**

→ Spectre en énergie des neutrons **1-20 MeV**

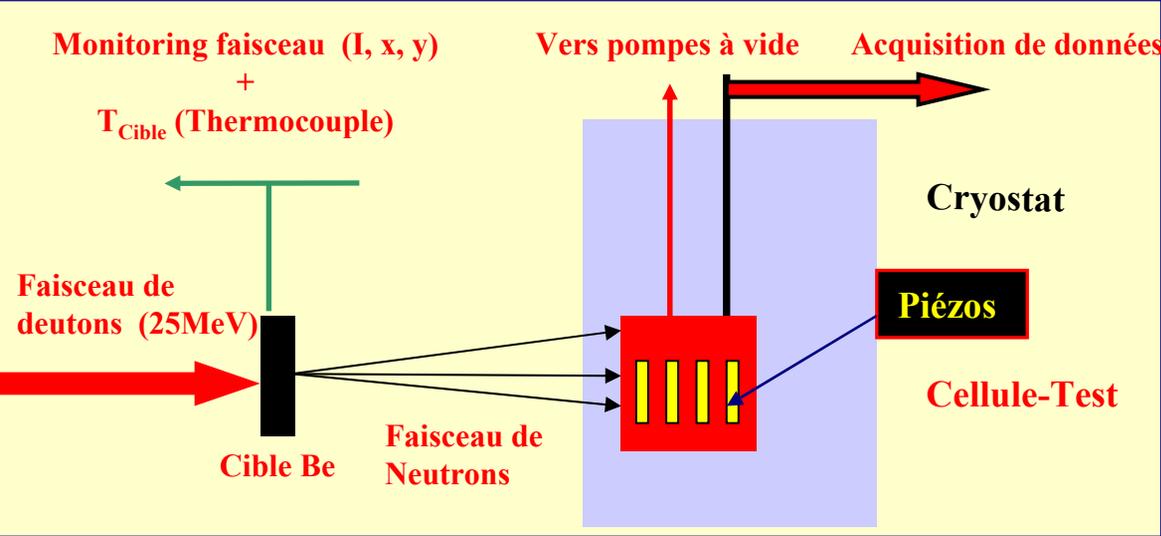
→ Dose totale **$\sim 10^{15}$ n/cm²** (10 ans fonctionnement LHC) obtenue en **~ 20 heures d'exposition**

● Dimensions du cryostat (Diamètre: 270 mm, Hauteur: 600 mm)

→ Peut fonctionner en Hélium liquide ou Argon liquide

→ **Distance minimum** entre source de neutrons et les composants irradiés : **80 mm**

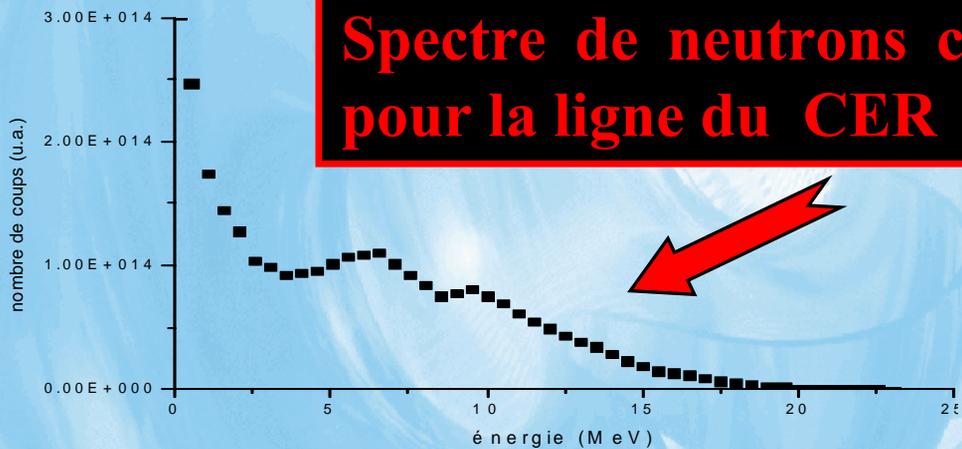
Dispositif d'irradiations à basse température



Cellule-test dans la ligne faisceau



Spectre de neutrons calculé pour la ligne du CER



Tests d'irradiation terminés: 11 actionneurs testés, bonne tenue

Mesure de la fluence des neutrons

- **Méthode d'activation** basée sur la réaction d'échange de charge du ^{58}Ni :
 $^{58}\text{Ni} (n,p) \rightarrow ^{58}\text{Co} \quad (1)$
- L'**activité des pastilles de Nickel de haute pureté foils** est déterminée par **spectrométrie γ** du ^{58}Co à **810 keV**
- Détecteur Ge-Li refroidi à l'azote liquide
ORTEC



Principales caractéristiques du détecteur Ge-Li

Pastilles de nickel

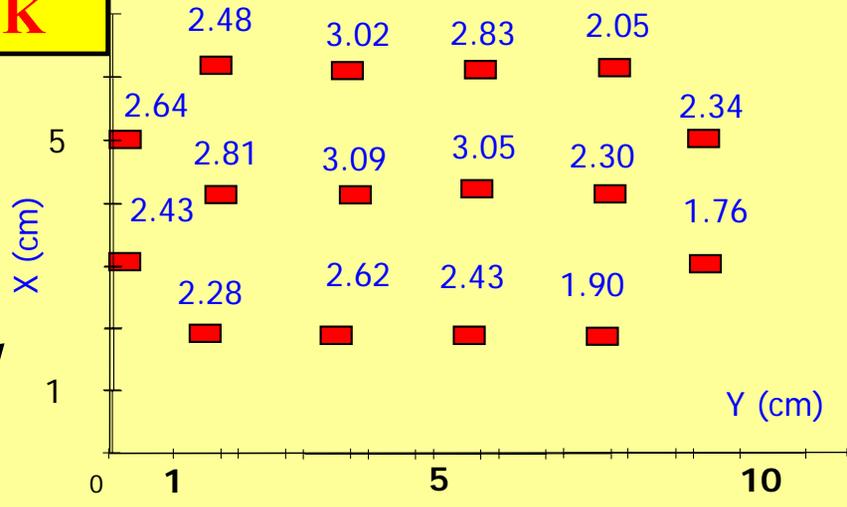
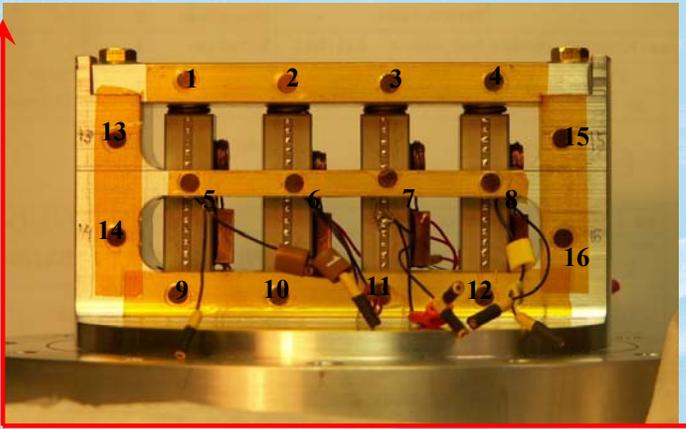
Diamètre du cristal	43 mm
Longueur du cristal	51.5 mm
Tension	+ 4800 V
Résolution (FWHM) @ 1.33 MeV	1.77 keV
Efficacité relative	11.4%
Résolution @ 122 keV	1.08 eV

Quatre actionneurs PICMA prêts pour les tests

Caractéristiques des pastilles de nickel

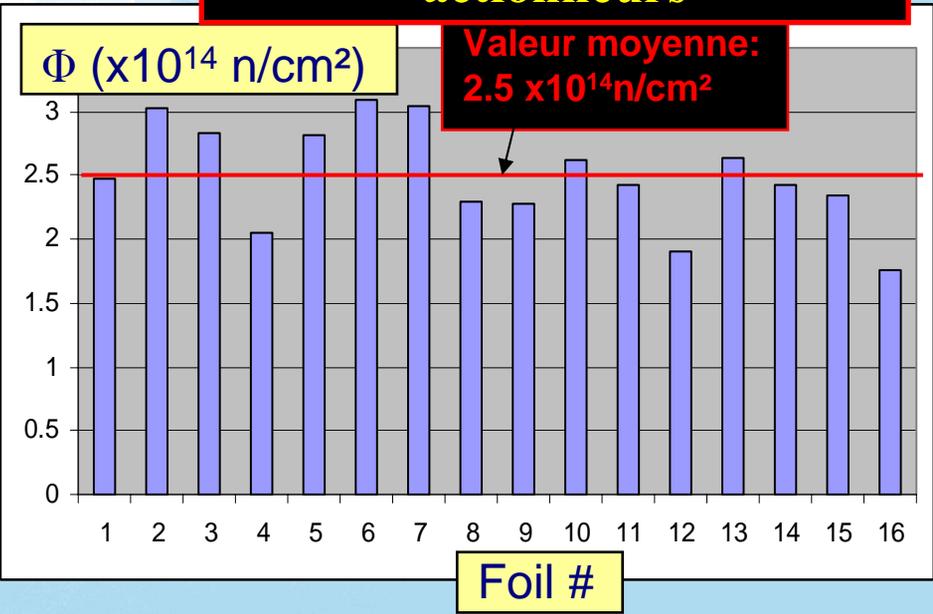
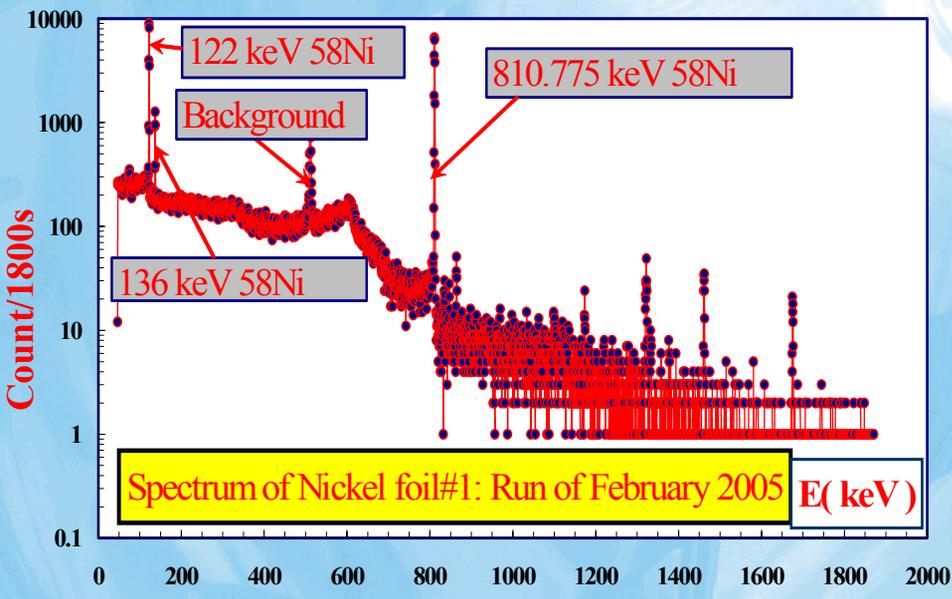
Diam.(mm)	Epais. (mm)	Masse (mg)	Pur.(%)
4	0.125	14.4	99.999

Test de quatre actionneurs PICMA à T=4.2K



Dose intégrée (x10¹⁴ n/cm²)- Dose de ~ 2-3.10¹⁴ n/cm² en 8h d'irradiations.

Carte de fluence des neutrons dans la zone des actionneurs



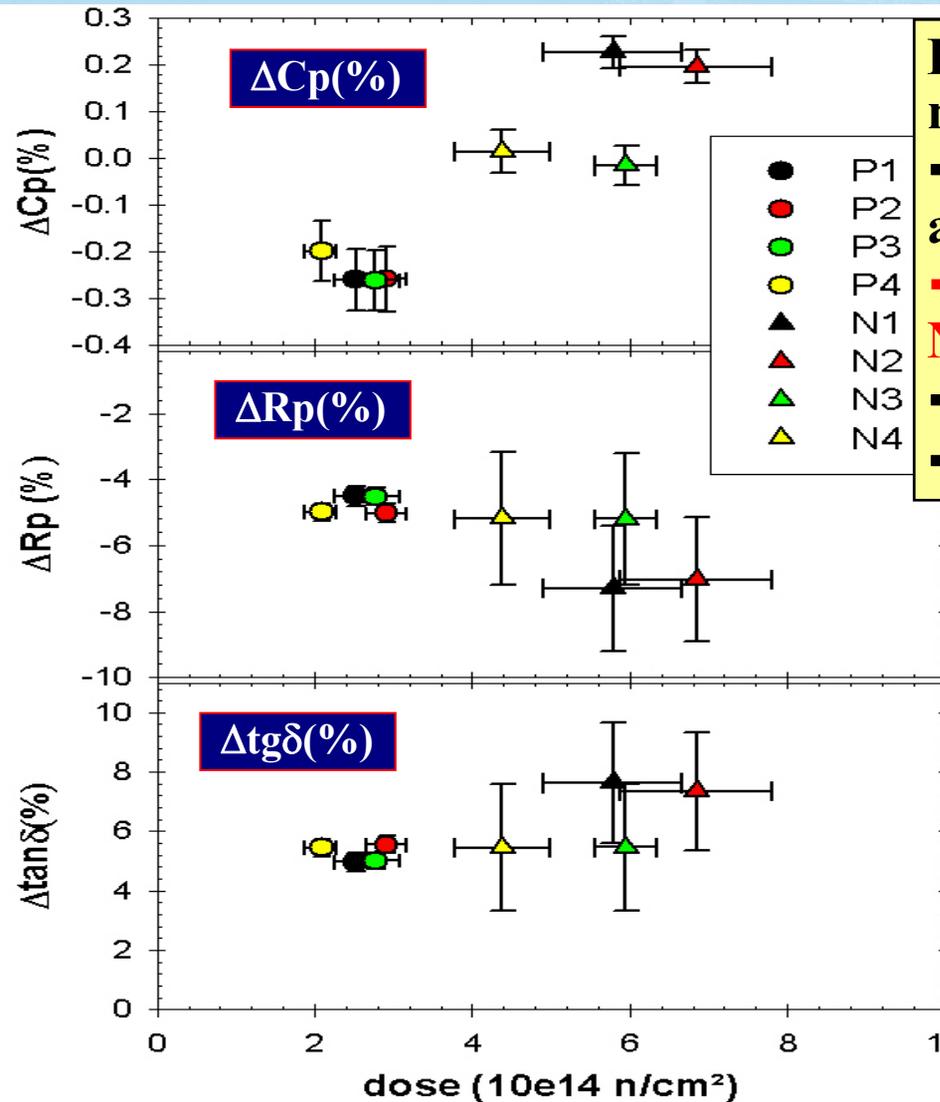
17/10/2006

M.FOUAIDY

Ecole IN2P3 "Nouveaux matériaux"

Effect of fast neutrons on actuators properties at T=4.2K

Capacité, résistance et angle de pertes versus dose totale. Actionneurs PICMA (P, ronds) and NOLIAC (N, triangles)



Dans la gamme des doses totales de neutrons étudiée: $2-7 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2$

→ C_p décroît de -0.25% pour les actionneurs PICMA

→ C_p croît de 0.15% pour les actionneurs NOLIAC

→ Angle de pertes augmente de 5 à 10 %

→ R_p décroît de 5 à 10 %

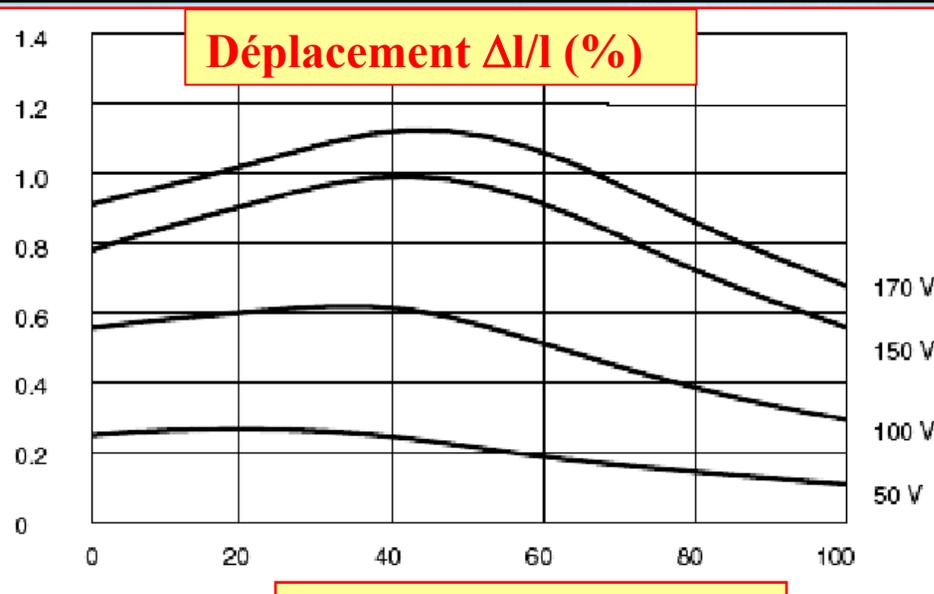


Pas de dommages majeurs!

Très faible dégradation des performances

Actionneurs PICMA et NOLIAC adaptés pour utilisation dans environnement cryogénique en présence de rayonnement neutronique pour des doses atteignant $\sim 7 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2$

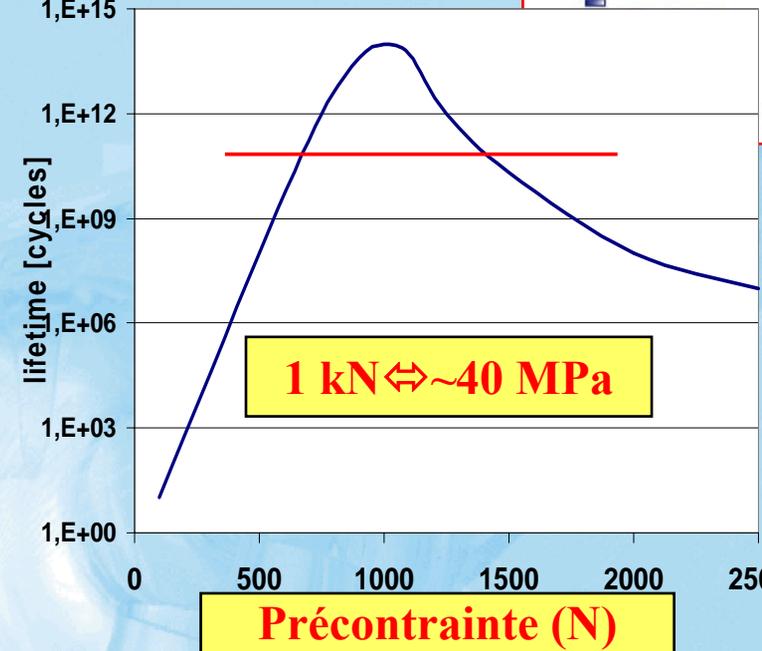
Motivations de l'expérience précontrainte à basse température



Précontrainte (MPa)

R. Bindig, G. Helke, Actuator 2000, Bremen, Germany.

Durée de vie (#Cycles)



La durée de vie dépend fortement de la précontrainte appliquée

Optimum à $T=300$ K $P_{Load} \sim 40$ MPa
 \rightarrow Force $F_{Load} \sim 4$ kN ($A=10^{-4} m^2$)
 \rightarrow A démontrer à $T < 4.2$ K

Haute performance exigée! La durée de vie et la fiabilité sont importantes et tout spécialement pour XFEL et ILC! Manque de données à basse température!

Une étude expérimentale du comportement électromécanique des actionneurs piézoélectriques soumis à une précontrainte axiale aux températures cryogéniques est nécessaire!

Objectifs de l'expérience précontrainte

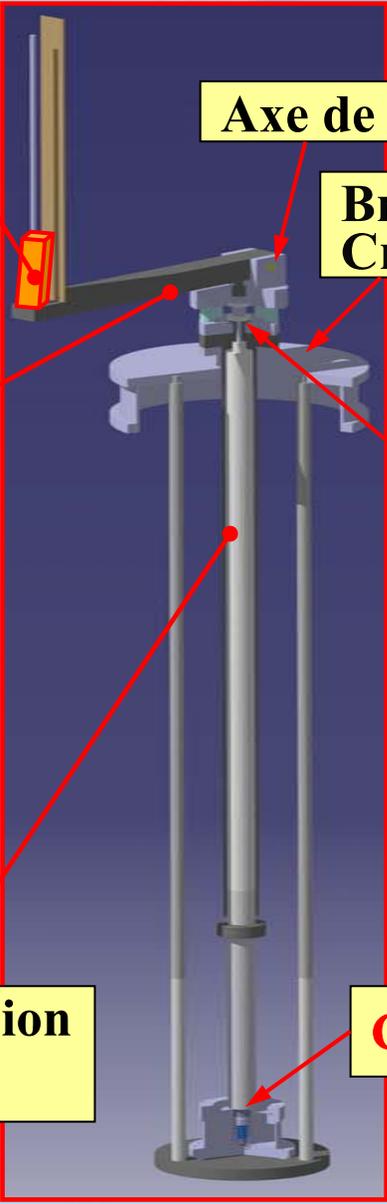
- Effet d'une précontrainte variable sur les caractéristiques électromécaniques (ΔX , C_p , R_p , $\text{tg}\delta$, Z , θ).
- Procédure pour appliquer, régler et contrôler cette précontrainte
- Etude de l'actionneur comme capteur de force
- Détermination de la rigidité mécanique de l'actionneur à basse température.

Principe de l'expérience précontrainte



Actionneur PICMA muni d'une chaufferette, d'une CERNOX étalonnée et d'une jauge de contrainte

Charge: $m = 1 \text{ Kg}$



Axe de Rotation

Bride insert Cryostat

Soufflet

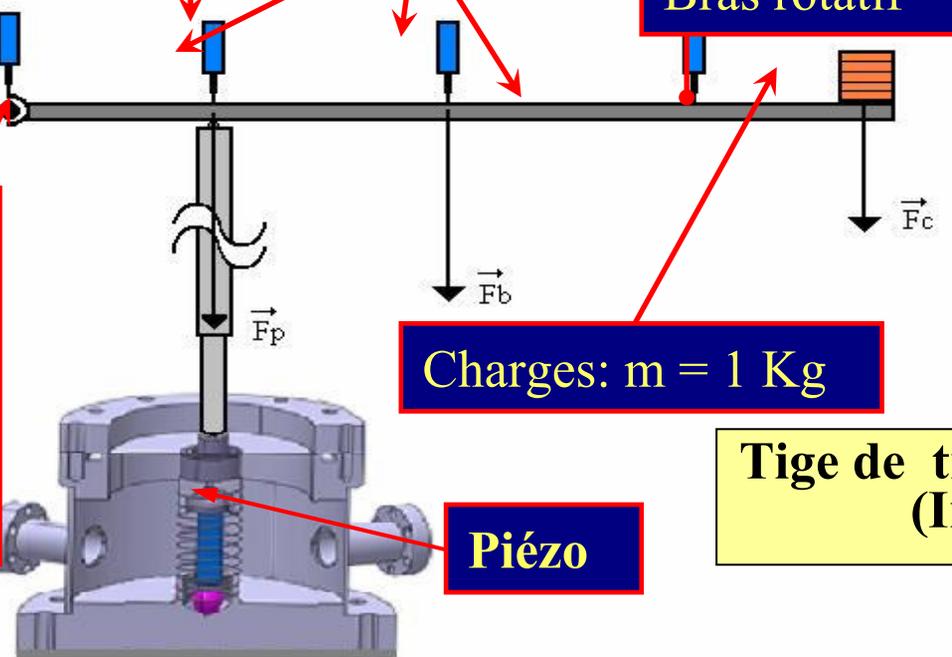
Cellule-test

Précontrainte: F_p

Capteurs de déplacement

Bras rotatif

Axe de rotation



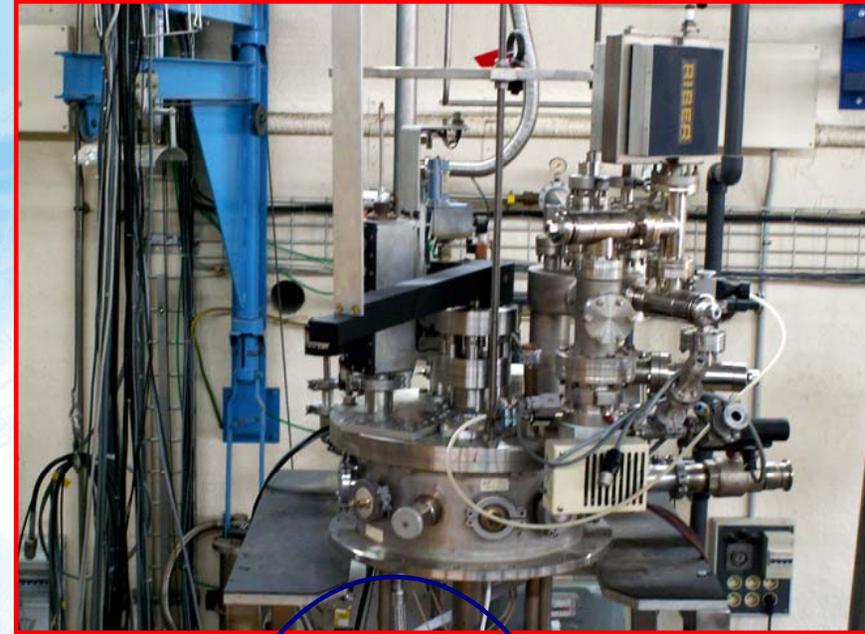
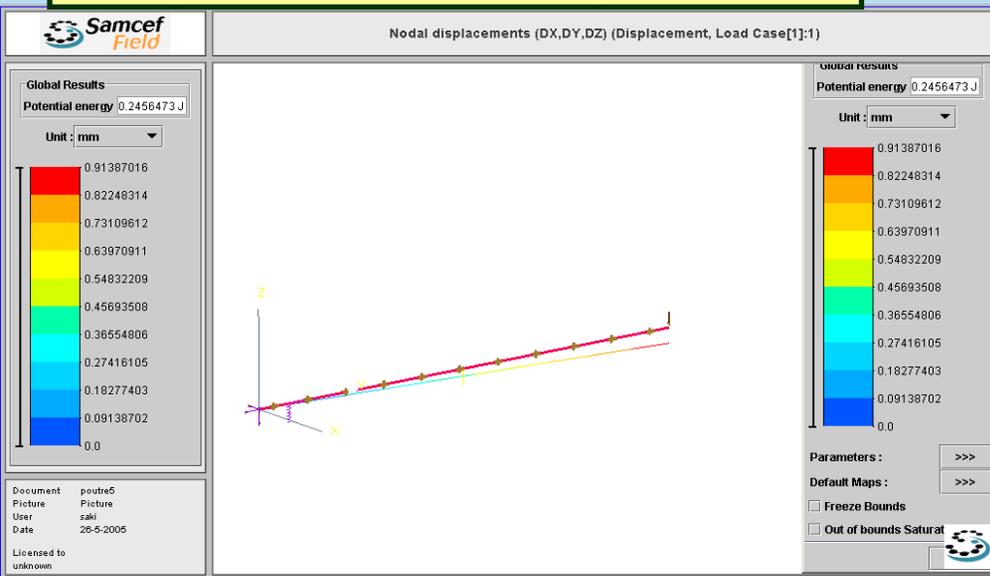
Charges: $m = 1 \text{ Kg}$

Tige de transmission (Inox)

Piézo

Etude du bras de levier

Objectif: $\Delta X_c / \Delta X_p = 14.7$



Géométrie (mm ³)	Matériau	ΔX_p (μm)	ΔX_c (μm)	$\Delta X_c / \Delta X_p$	Flèche (μm)
Barre 500x40x10	Aluminium	66.07	27490	416	26521
Tube Ep.2 500*20*20	Aluminium	66.37	12379	186	11406
Barre 500x45x45	Acier étiré	59.44	913	17.7	42.5

Acier étiré de section 45x45 $\Delta X_c / \Delta X_p = 17.7$: proche de l'Objectif



Capacité versus précontrainte à T=4.4 K: test de répétabilité

$$\Delta C_p = C_p(F) - C_p(F_0)$$

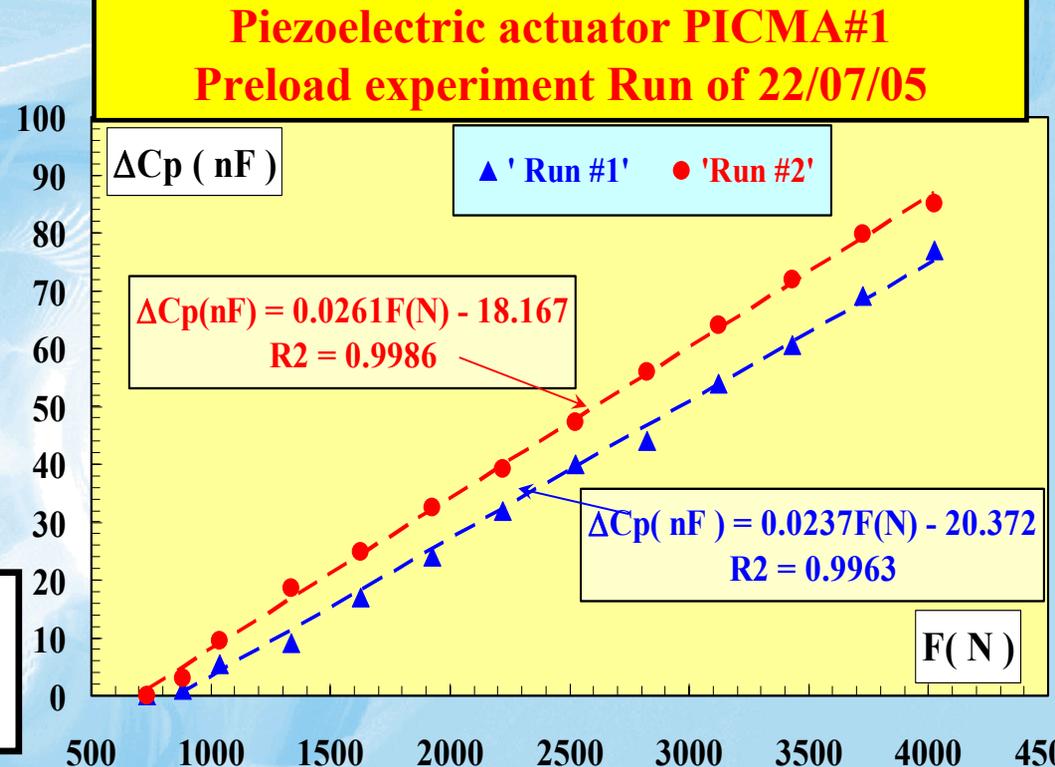
F: précontrainte

F₀: poids propre du bras

$$C_p(F_0) = 3.134 \mu\text{f} @ 4.4 \text{ K}$$

$$F_0 = 733 \text{ N}$$

Relation linéaire pour F dans la gamme the 733 N- 4000 N



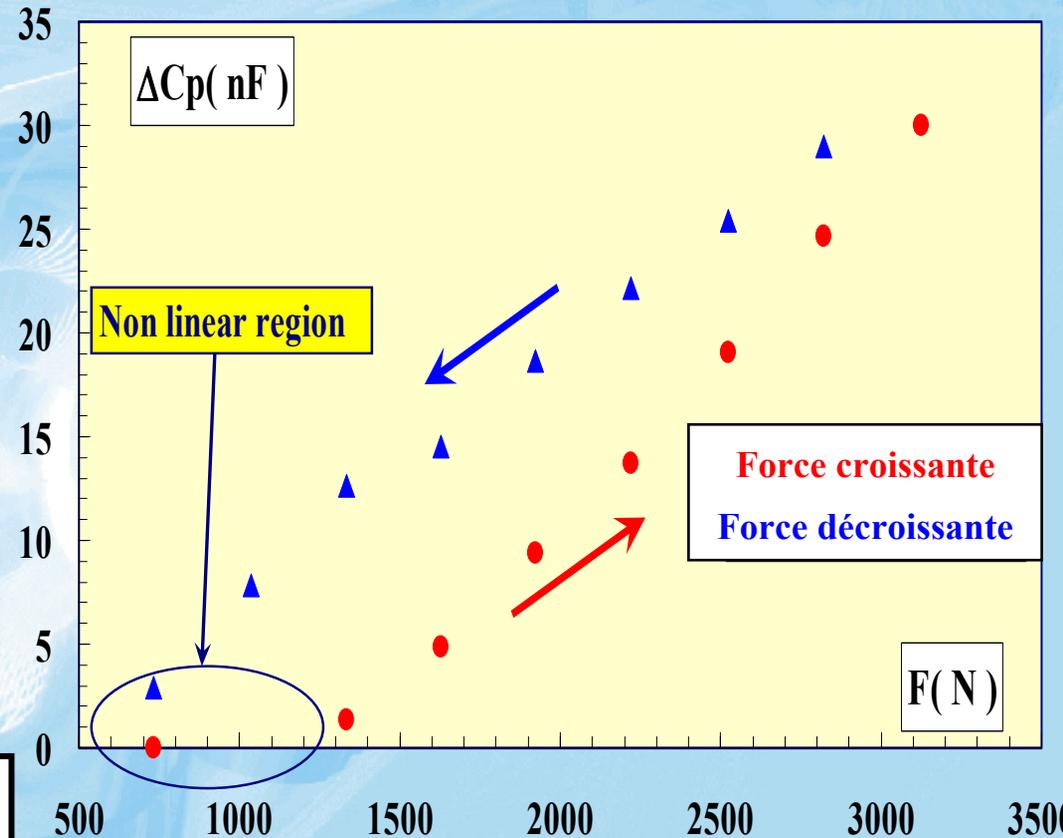
Sensibilité à la précontrainte
 $\Delta C_p / \Delta F = 24.9 \text{ nF/kN}$
F croissant: répétabilité $\pm 5\%$

Capacité versus précontrainte à T=2.05 K: précontrainte croissante et décroissante

$C_p(F_0) = 2.888 \mu\text{f} @ 2.05\text{K}$

Comportement linéaire
pour $F < 1400 \text{ N}$ (Non
intrinsèque!)

Forte hystérésis due à des
irréversibilités (effet
piézoélectrique, friction,
jeu,...)

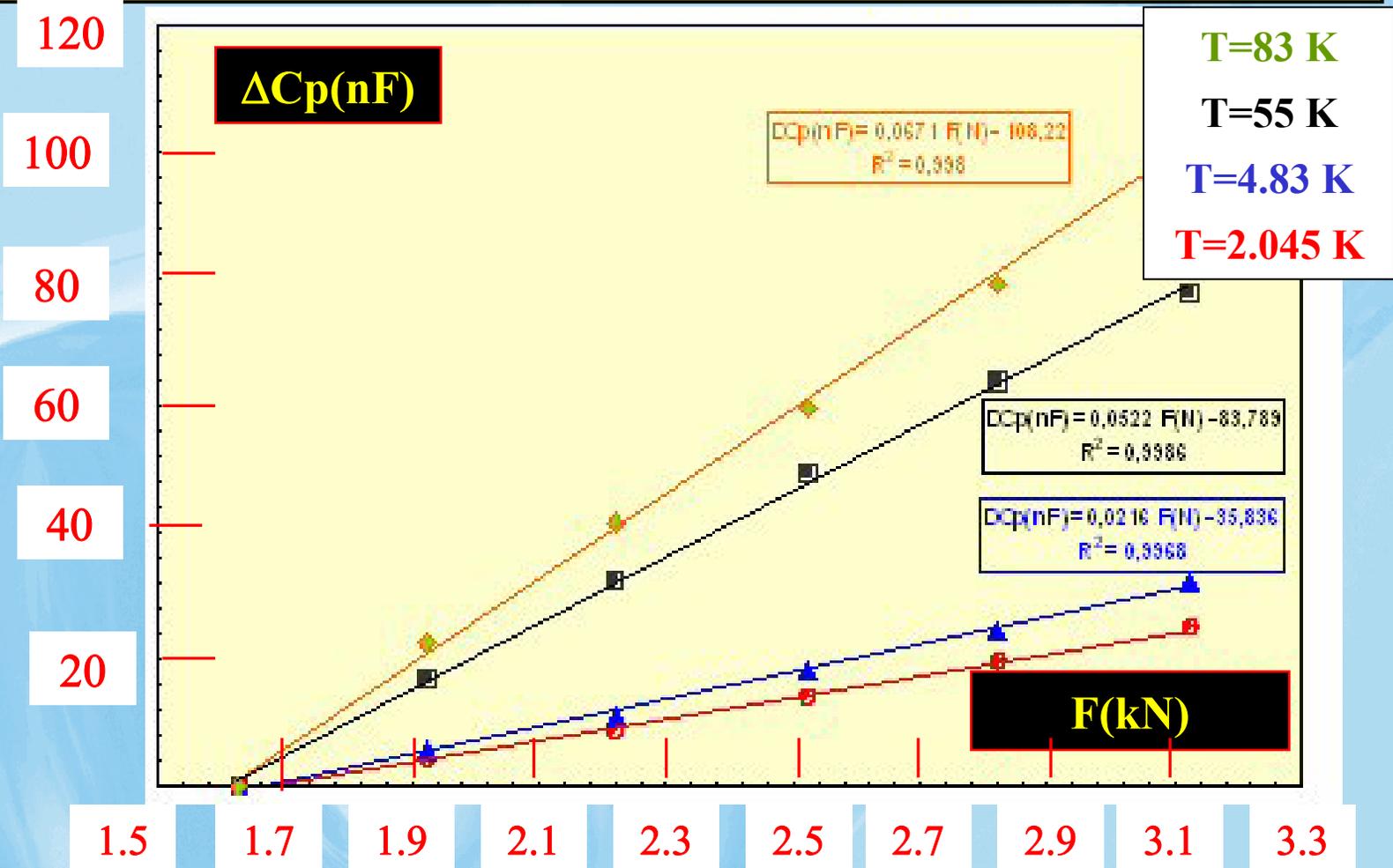


Région linéaire: $F > 1350 \text{ N}$

Sensibilité pour F croissant : $\Delta C_p / \Delta F = 16 \text{ nF/kN}$

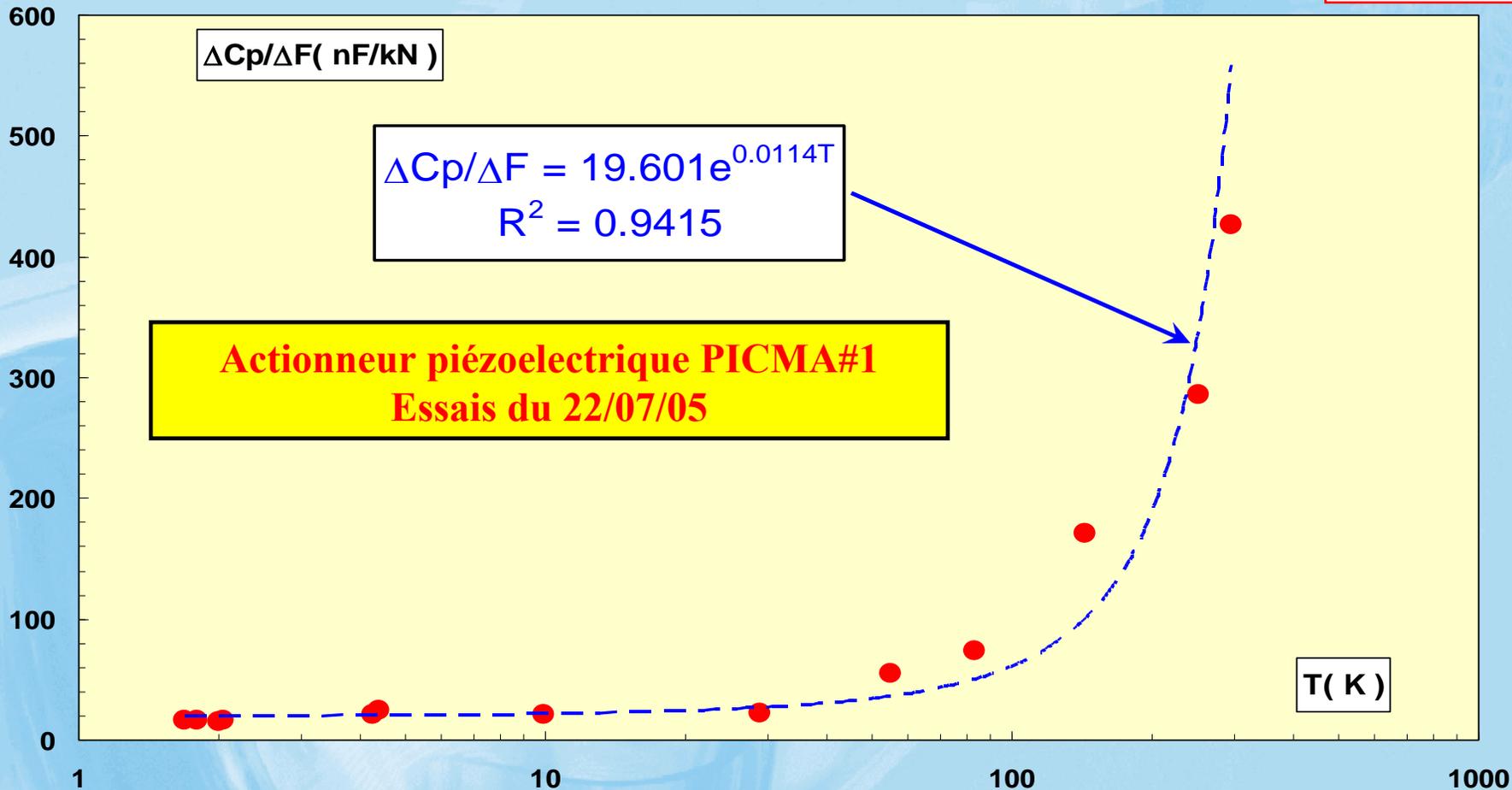
Sensibilité pour F décroissant : $\Delta C_p / \Delta F = 10 \text{ nF/kN}$

Capacité versus précontrainte pour T=2.05 K- 83 K (précontrainte croissante)



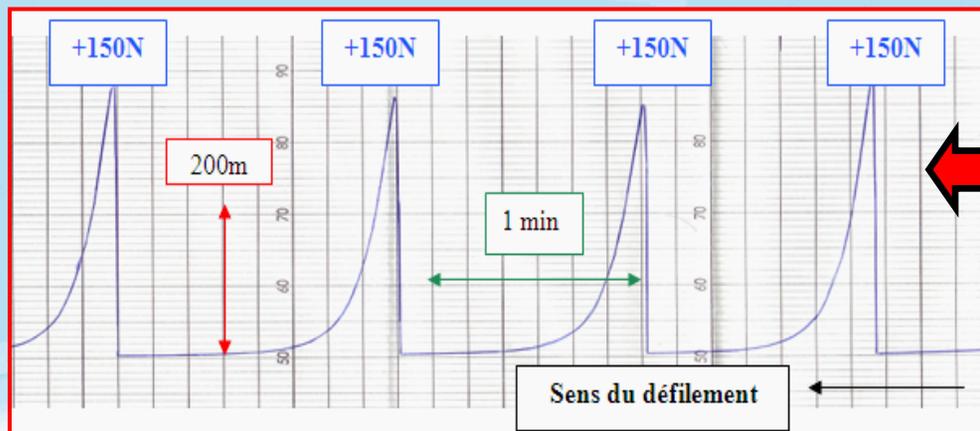
Linéarité: à T fixée, $\Delta C_p \propto F$ pour $F > 1800$ N
Pente $\Delta C_p / \Delta F$: sensibilité à la précontrainte

Sensibilité à la précontrainte versus la température



Dépendance exponentielle: $\Delta C_p / \Delta F$ augmente avec T
de 16 nF/kN @ T=2 K à 426 nF/kN @ T=300 K

Réponse transitoire à un échelon de précontrainte



Actionneur PICMA

Test de répétabilité à T=2K

Sensibilité: 4.7 V/kN

Test à T=4.2K

Bonne répétabilité

Réversibilité

Sensibilité: 21.4 V/kN

Linéarité : $\Delta V \propto \Delta F$



L'amplitude du signal transitoire dépend
fortement de T!

Dépend fortement du matériau!

Capteur de force très sensible

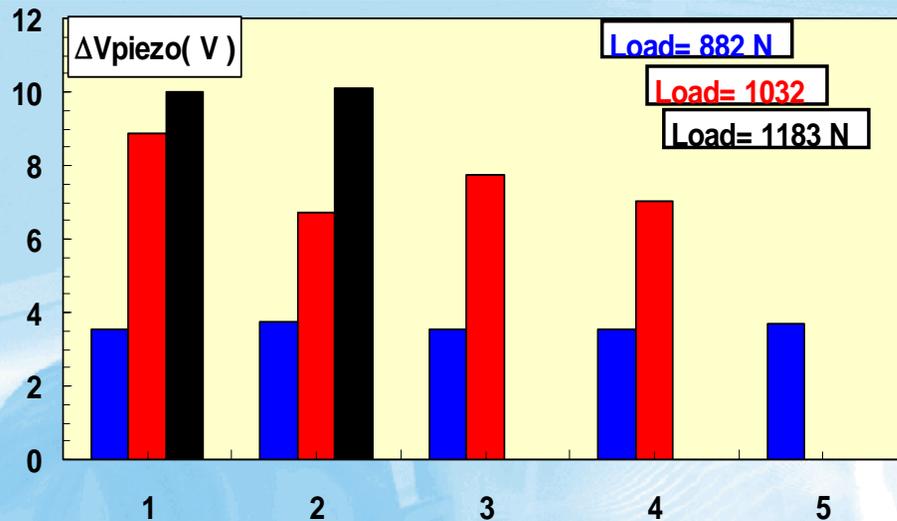
Actionneur Noliac.

P.SEKALSKI MIXDES 2005

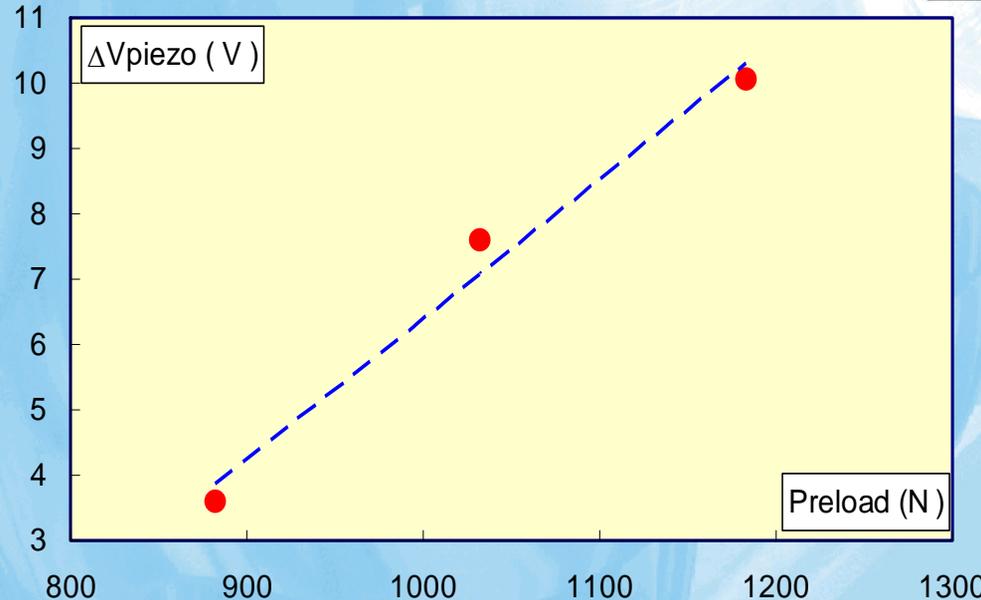
14V/kN @ T= 300K

15V/kN @ T= 7-16K

Amplitude du signal transitoire pour différentes précontraintes à T=4.2K



- Bonne sensibilité:
- $\Delta V/\Delta F=21.4V/kN$ à 4.2K
- Bonne répétabilité
- Comportement linéaire

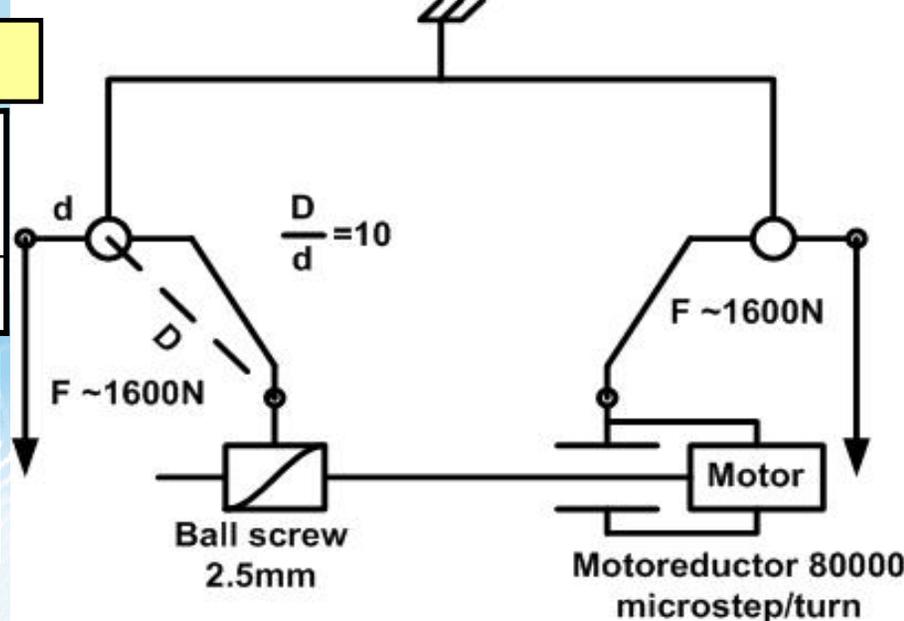


- Etude systématique en fonction de T nécessaire!
- Plus de statistiques!
- Comparaison avec NOLIAC

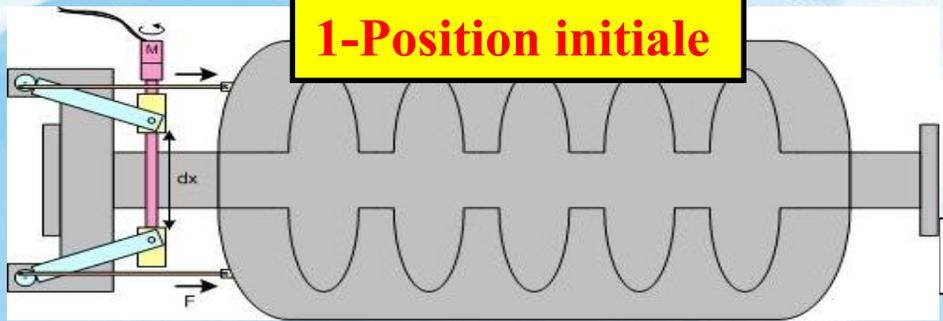
PARAMETRES CALCULES DU SAF

$\Delta f/dz$ (Hz/mm)	Kcav (N/mm)	Ktank (N/mm)	kCTS (N/mm)
250	1600	55000	15000

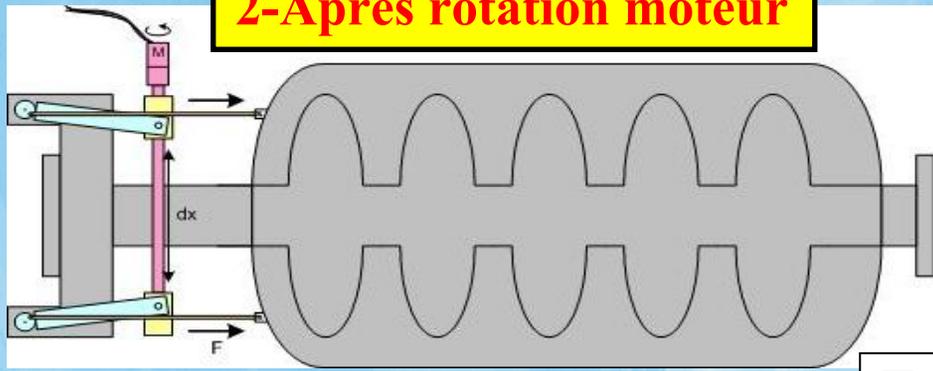
A	Résolution mécanique	Résolution en fréquence
0.88	1.37 nm	0.34 Hz



1-Position initiale

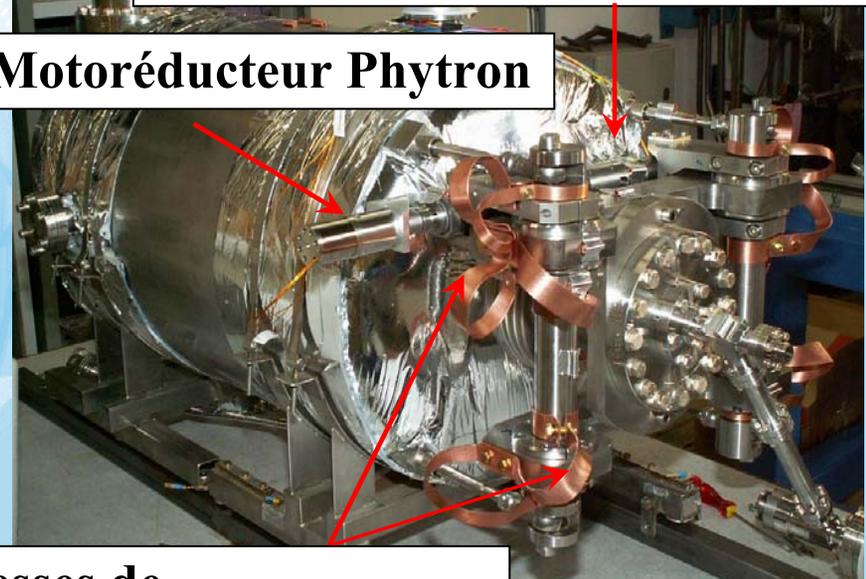


2-Après rotation moteur



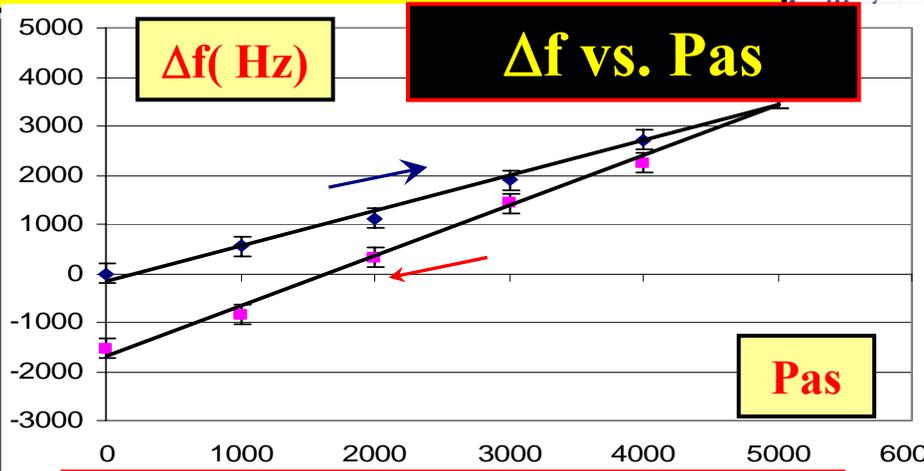
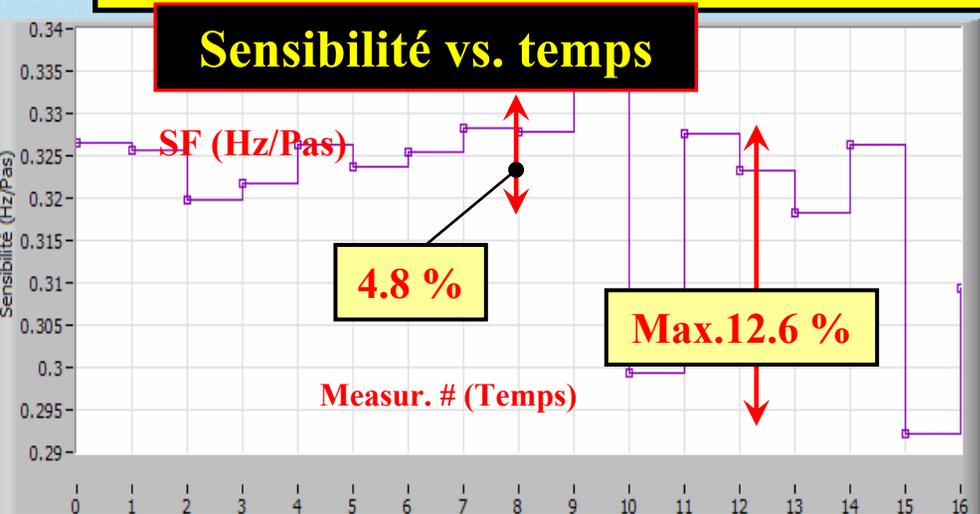
Vis-Ecrou (céramique avec traitement de surface: MoS2)

Motoréducteur Phytron



Tresses de thermalisation en cuivre

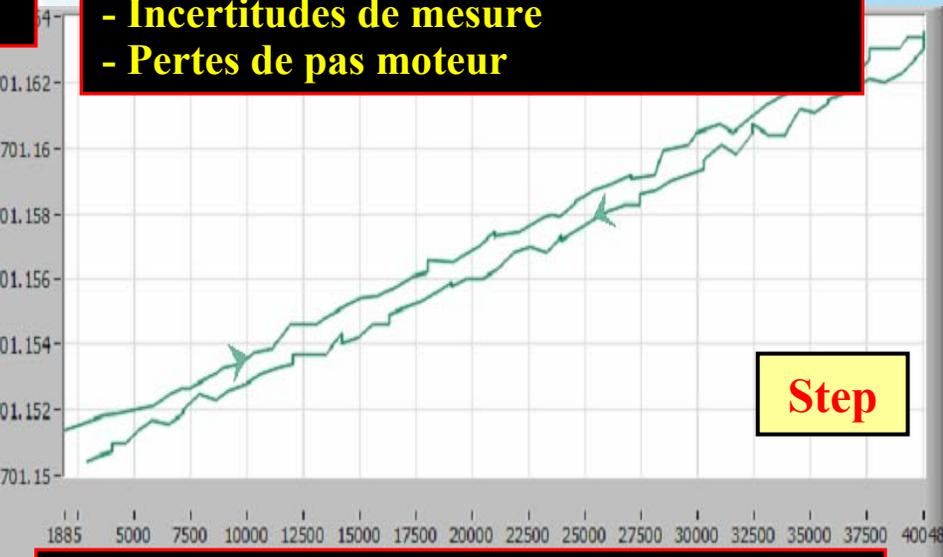
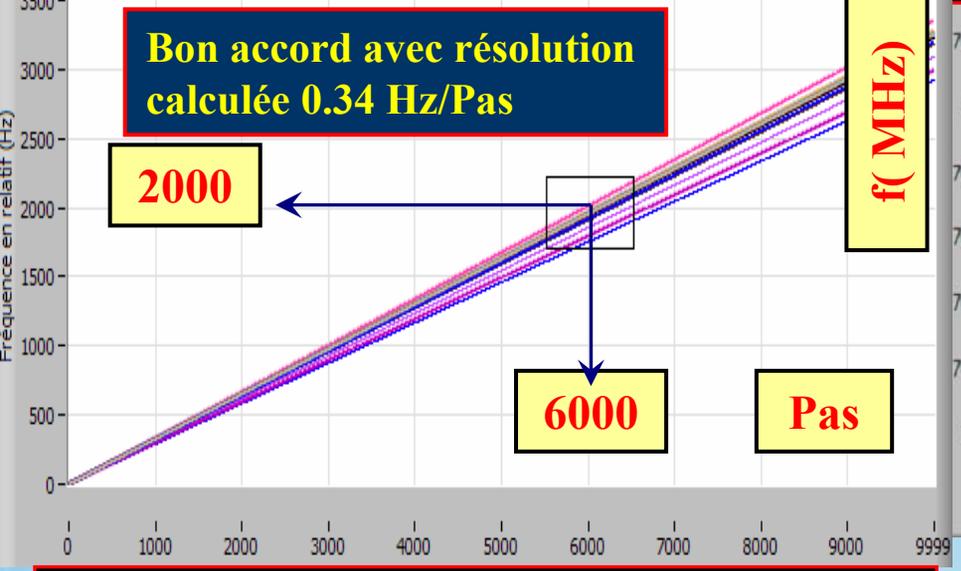
PREMIER TEST SAF DANS CRYHOLAB



Pas d'effet de l'histoire et du déplacement maximal sur la caractéristique ΔF vs Pas

Un offset du même ordre ~ 1 kHz a été mesuré à 300K.

- Incertitudes de mesure
- Pertes de pas moteur

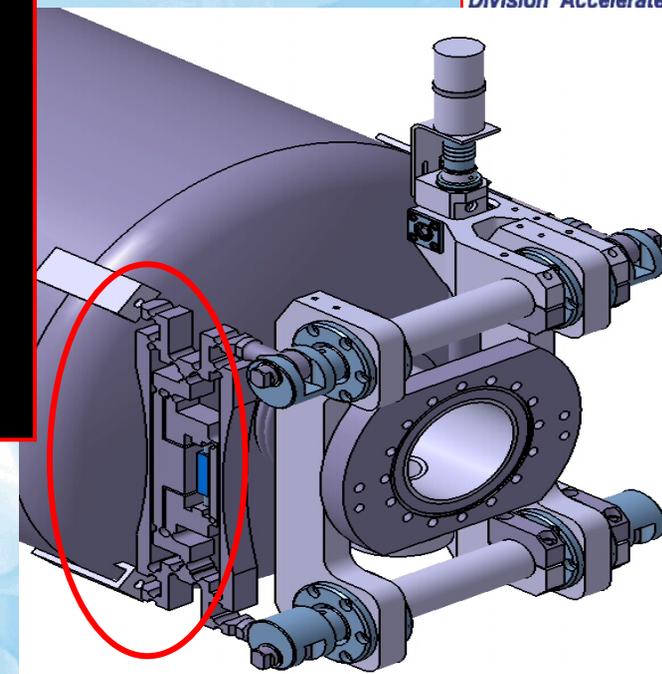


Valeurs ΔF vs Pas répétable à ± 5 %

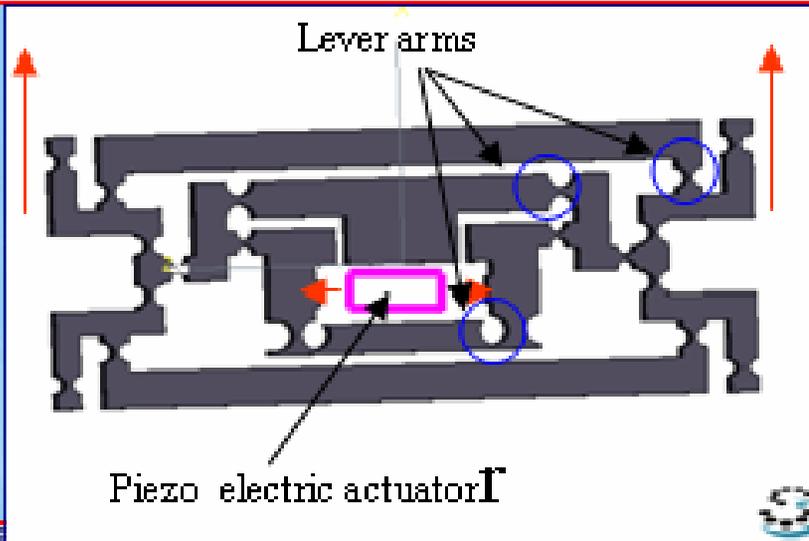
Hystérésis et offset de la fréquence de résonance



- Basé sur le concept d'actionneur piézoélectrique amplifié
- Faible déplacement ($<3.5 \mu\text{m}$ @2 K) → Amplification
- Support des actionneurs: en titane avec système de bras de leviers → amplification du déplacement



Support placé entre l'enceinte hélium et le SAF : il remplacera les barres de compression du SAF initial.



Simulation par éléments finis: déplacement amplifié par un facteur 3 suivant la direction longitudinale de la cavité