

# Comment améliorer la dérive des résonateurs à quartz pour applications spatiales?

Travaux menés par  
Bruno DELMAS

Sous la direction de  
Dr. Jean-Jacques BOY

I N S T I T U T D E R E C H E R C H E

F E M T O - S T

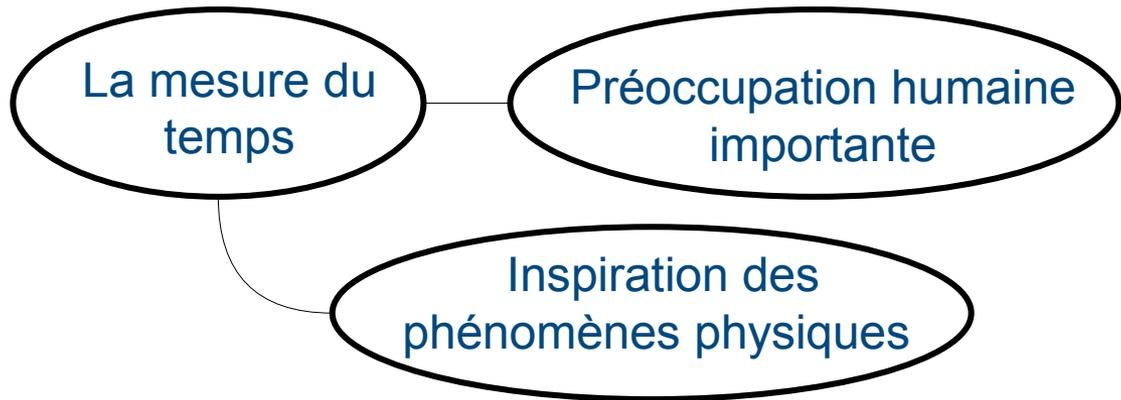
**femto-st**  
sciences & technologies

**TEMEX** 

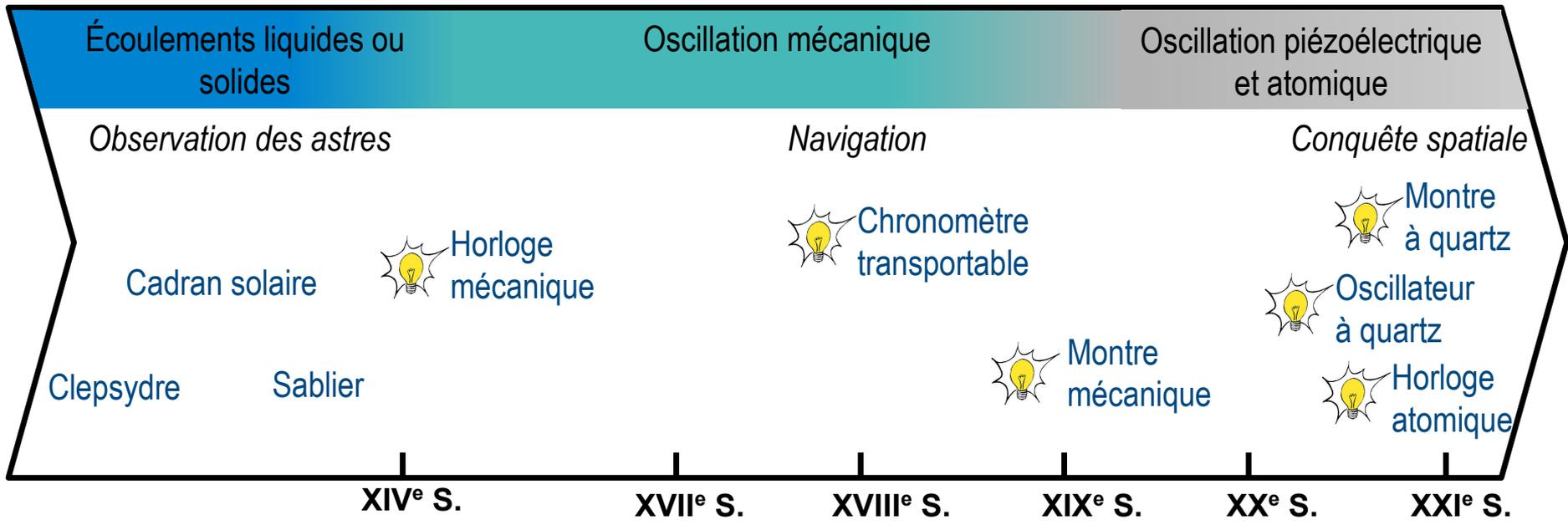


cultiver l'innovation,  
de la recherche fondamentale  
au partenariat industriel

[www.femto-st.fr](http://www.femto-st.fr)



- 1 - L'organisation sociale et économique.
- 2 - La navigation : estimer la longitude.
- 3 - Synchronisation des communications.
- 4 - La conquête spatiale : la précision de positionnement.
- 5 - L'explosion des moyens de communication.



La mesure du temps



La mesure de fréquence

Applications spatiales

- Plage de température étendue.
- Stabilité à court terme.
- Stabilité à long terme.
- Volume et poids réduits.

**Coût**

	Oscillateurs à quartz			Horloges atomiques		
	TCXO	MCXO	OCXO	Rubidium	RbXO	Cesium
Vieillessement / an	$5 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-10}$	$2 \times 10^{-10}$	$5 \times 10^{-11}$
Stabilité / température (Plage de T, °C)	$5 \times 10^{-7}$ (-55 à +85)	$3 \times 10^{-8}$ (-55 à +85)	$1 \times 10^{-9}$ (-55 à +85)	$3 \times 10^{-10}$ (-55 à +68)	$5 \times 10^{-10}$ (-55 à +85)	$2 \times 10^{-11}$ (-28 à +65)
Stabilité, $\sigma_y(\tau)$ ( $\tau = 1s$ )	$1 \times 10^{-9}$	$3 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-12}$	$3 \times 10^{-12}$	$5 \times 10^{-12}$	$5 \times 10^{-11}$
Volume (cm <sup>3</sup> )	10	30	20-200	200-800	1 000	6 000
Prix (~€)	10 - 100	<1 000	200-2 000	2 000-8 000	<10 000	50 000

## Généralités.

Le résonateur à quartz de coupe SC.

## Le vieillissement.

Définition et sa problématique.

Les mécanismes à l'origine de cette dérive.

## Étude de la répartition des contraintes mécaniques.

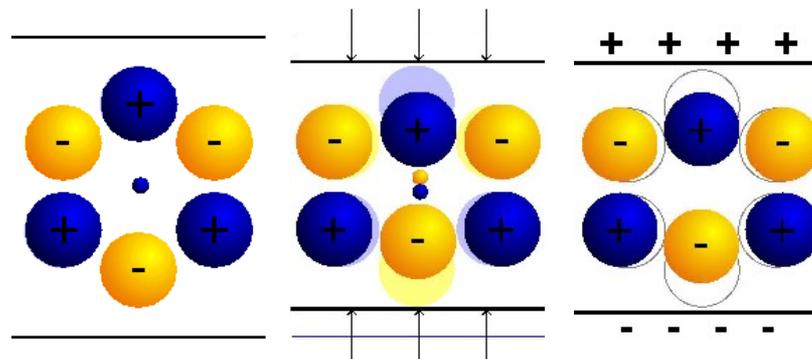
Sensibilité de la fréquence aux forces extérieures.

## Étude expérimentale : le pré-vieillissement.

Plan d'expériences.

## Conclusion générale.

## La piézoélectricité



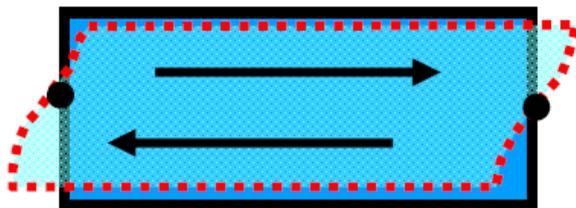
Lien entre déformation mécanique et charges électriques.

## Résonateur à quartz.

Vibration mécanique sur un mode propre de résonance du matériau.

Mode de cisaillement d'épaisseur

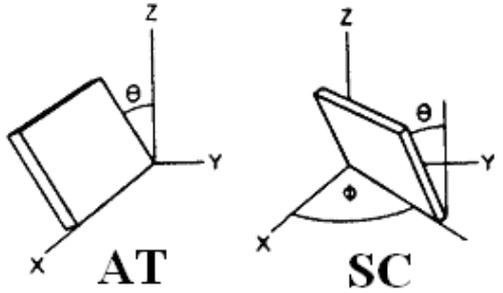
Propriétés remarquables du quartz



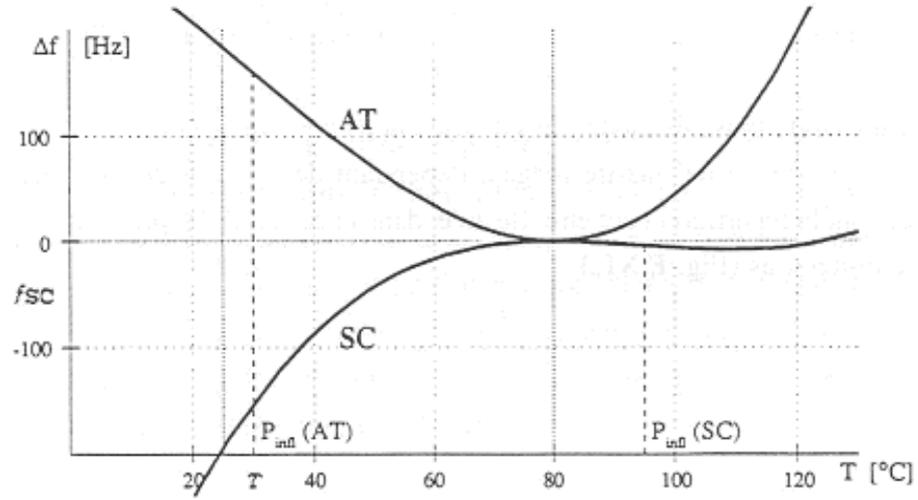
**Fréquence très stable.**

Le résonateur de coupe SC ( $XYwl$ )  $22^\circ, 34^\circ$ .

Coupe à double rotation.



Fabrication plus complexe.  
→ Bien maîtrisée.



Par rapport à la coupe AT :

- ⇒ Mode C moins sensible à T(°C).
- ⇒ Moins sensible aux radiations.
- ⇒ Insensibilité aux forces dues aux électrodes circulaires.



## Généralités.

Le résonateur à quartz de coupe SC.

## Le vieillissement.

Définition et sa problématique.

Les mécanismes à l'origine de cette dérive.

## Étude de la répartition des contraintes mécaniques.

Sensibilité de la fréquence aux forces extérieures.

## Étude expérimentale : le pré-vieillissement.

Plan d'expériences.

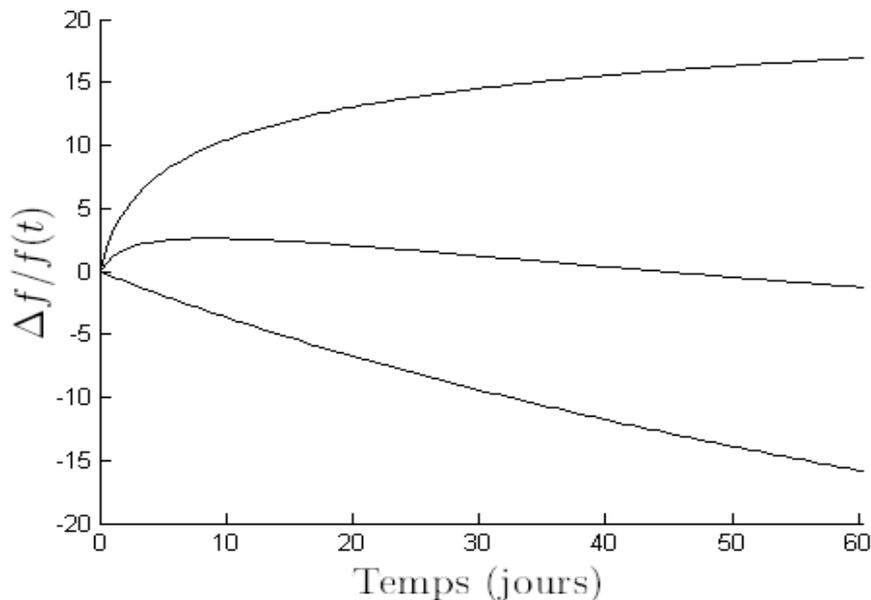
## Conclusion générale.

## Définition :

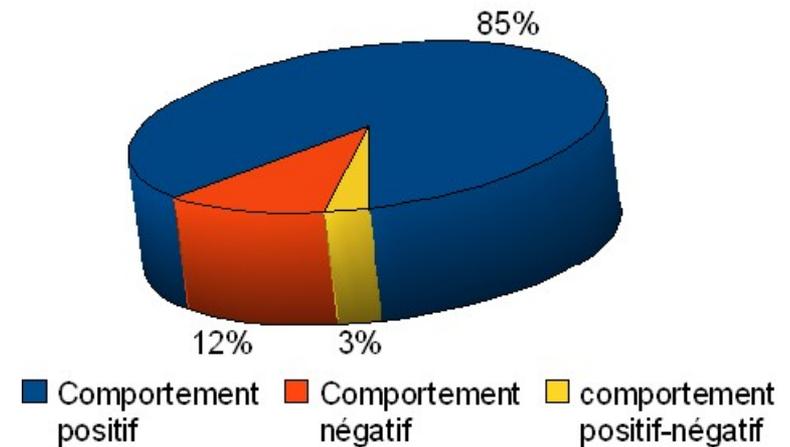
*Variation systématique de la fréquence de résonance en fonction du temps due aux changements internes au résonateur.*

Vieillessement pour un résonateur de coupe SC :  $\approx 10^{-11}/\text{jr}$  après 60 jours.

→ Trois comportements :



En production :



(source TEMEX).

Vieillessement = changement de la fréquence de résonance.

- ⇒ erreur dans les mesures de distances : problème dans le positionnement
- ⇒ retard pour les signaux de communication à synchroniser.

Solution électronique : dispositif de rattrapage de la dérive.

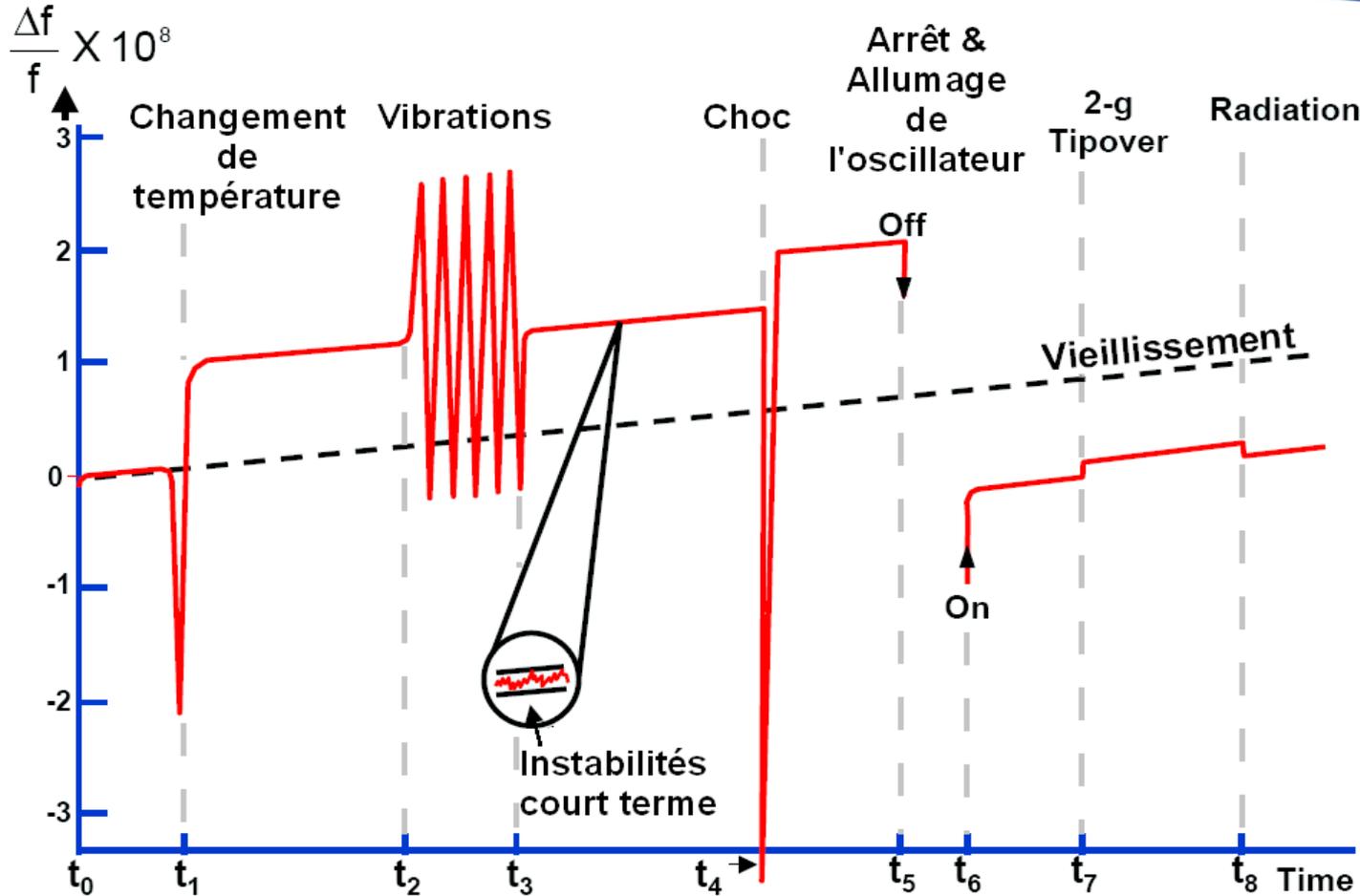
→ la varicap (généralement limitée à qq  $10^{-7}$ )

Exemple concret.

Supposons : | ⇒ Vieillessement =  $2 \cdot 10^{-11} / jr$  (  $\approx 7,3 \cdot 10^{-9} / an$  )  
| ⇒ Varicap =  $\pm 10^{-7}$

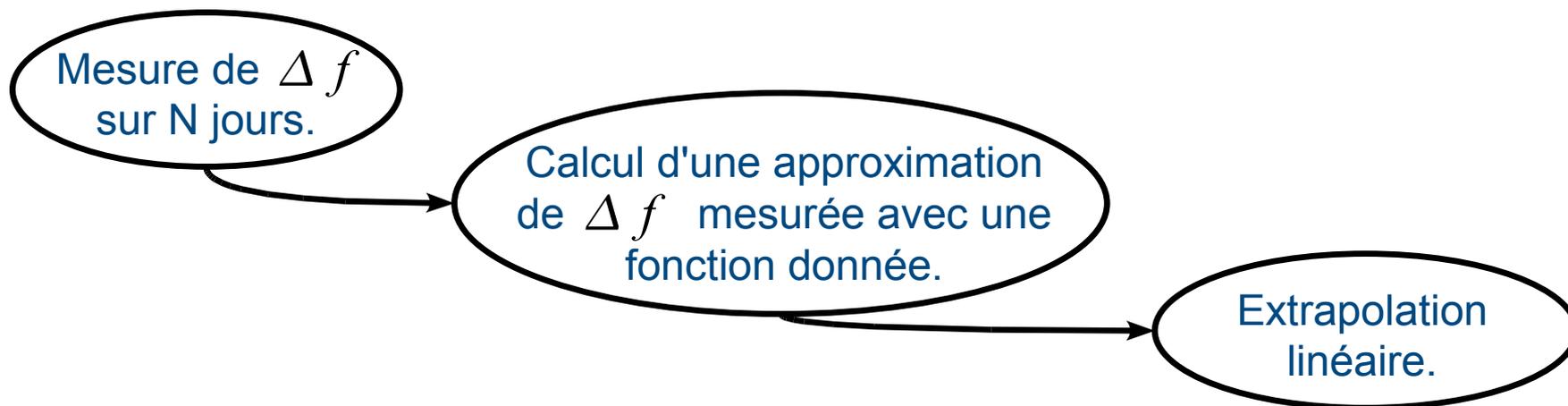
Durée de vie de l'oscillateur  $\leq 14$ ans

**Si le vieillissement est l'unique source de dérive**



- ➔ Prédire le vieillissement de façon fiable.
- ➔ Réduire le vieillissement (connaissance des phénomènes physiques).

## Prédire le vieillissement.



## Normes : MIL-PRF-55310D

- Fonction :  $\Delta f_{T_a} = A \cdot \log(B \cdot T_a + 1)$

$T_a$  : durée de mesure.

- Méthode d'extrapolation :

$$\Delta f(1\text{an}) = \underbrace{\frac{A \cdot B}{B \cdot T_a + 1} \cdot (365 - T_a)}_{\text{Tangente à la fin de } T_a} + \underbrace{\Delta f_{T_a}}_{\text{Vieillessement pendant } T_a}$$

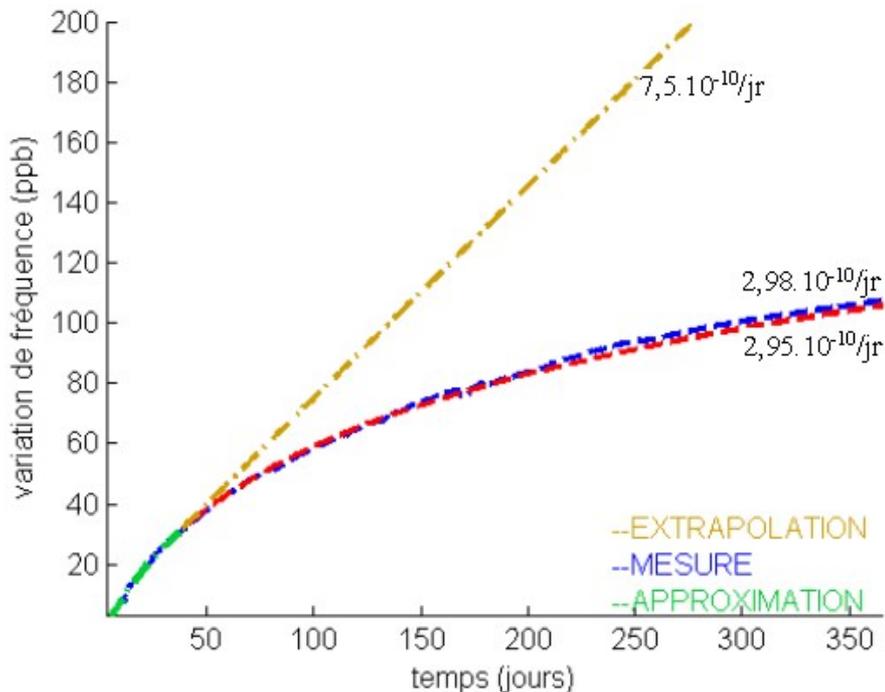
Tangente à la fin de  $T_a$ .

Vieillessement pendant  $T_a$ .

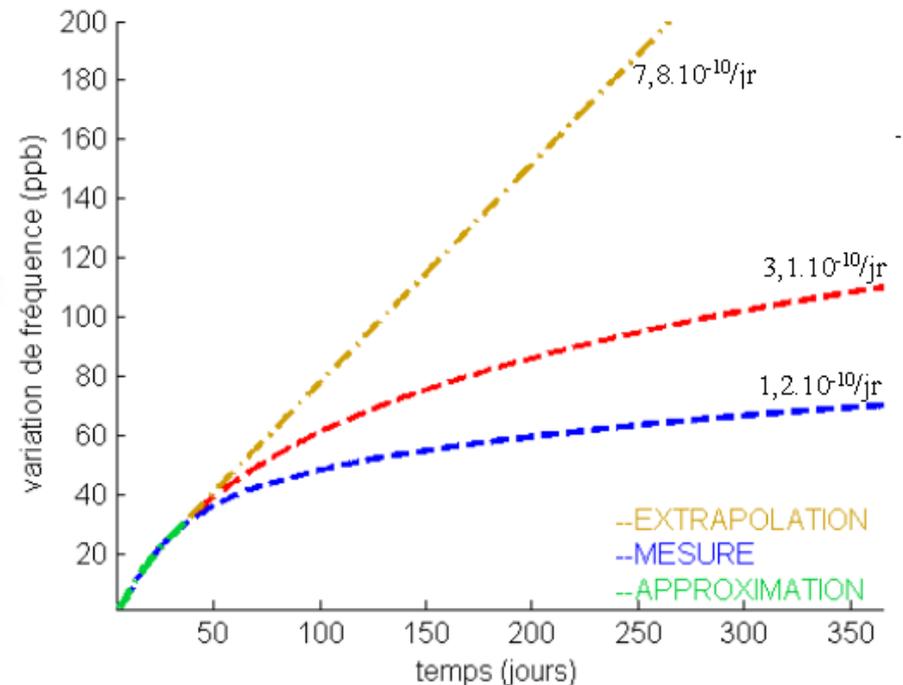
## 2 étapes du vieillissement :

-  **Vieillissement initial** → Les premiers jours; données de l'approximation.
-  **Vieillissement nominal** → Quasi-linéaire; l'objet de l'extrapolation.

### Vieillissement initial faible



### Vieillissement initial fort



Vieillissement → Plusieurs causes physiques.

## Les transferts de masses.

- ↪ La contamination.
- ↪ Adsorption-désorption.
- ↪ Dégazage du quartz.
- ↪ Les effets de diffusion.

## Les contraintes mécaniques.

- ↪ Les électrodes.
- ↪ La structure de montage.

## Les transferts de masses.

Changement de la répartition des masses en vibration.

### → La contamination.

Boîtier HC40 : 3 cm<sup>3</sup> fermé sous : 10<sup>-8</sup> mbar à 25 °C

Équation des gaz parfaits :  $P.V = n.R.T$  ( $R=8,314 J.K^{-1}.mol^{-1}$ )

$n = 1,2.10^{-12} mole$  de gaz sont enfermées dans le boîtier.

Exemple : molécule d'eau (18 g.mol<sup>-1</sup>)

Poids du gaz présent dans le boîtier : 2,1.10<sup>-11</sup> g

Si tout le gaz se dépose sur le résonateur, la variation de fréquence sera de :

$$\frac{\Delta f}{f_0} = 5.10^{-10}$$

(calculée avec la relation établie par Sauerbrey :  $\Delta f = \frac{2.f_0^2}{\sqrt{\rho\mu_q}} \frac{\Delta m}{A}$  )

→ Phénomène provoquant au pire 5.10<sup>-10</sup> sur la durée de vie du résonateur.

## ↳ Adsorption-désorption.

Quantité mise en jeu :

- ↳ La pression.
- ↳ Polluants déposés sur les différentes surfaces.
- ↳ Gaz issus de chaque pièce du résonateur.

Multiplicité des gaz

+

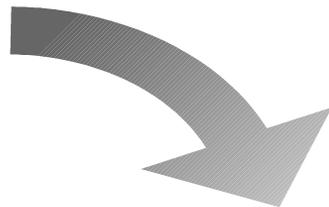
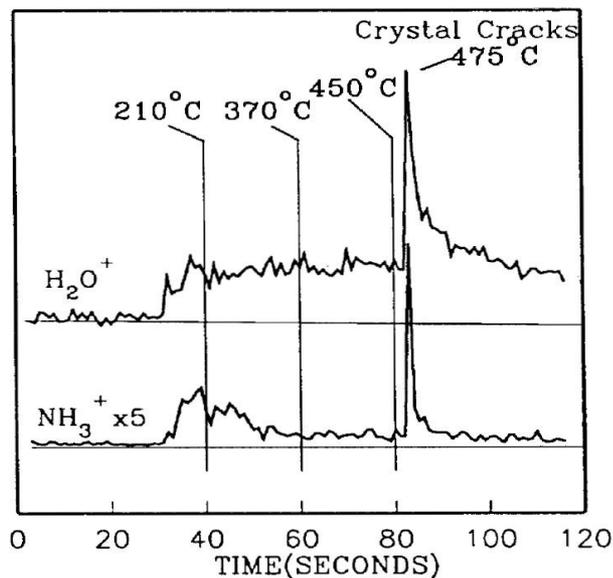
Nature réversible de l'adsorption-désorption

Effet ondulateur sur la variation de fréquence.

**NON OBSERVE**

→ L'effet sur la fréquence est très faible et ne peut pas justifier  $\frac{\Delta f}{f_0} \approx 10^{-12} / jr$

## ➔ Dégazage du quartz.



300°C Bakeout	Surface coverage (monolayers)	Desorption rate at 100°C (monolayer/day)	Aging rate per day
0 hr.	1	$8 \times 10^{-7}$	$8 \times 10^{-13}$
1 hr.	0.5	$4 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-13}$
10 hrs.	0.001	$8 \times 10^{-10}$	$8 \times 10^{-15}$

Dégazage des molécules d'eau du quartz.

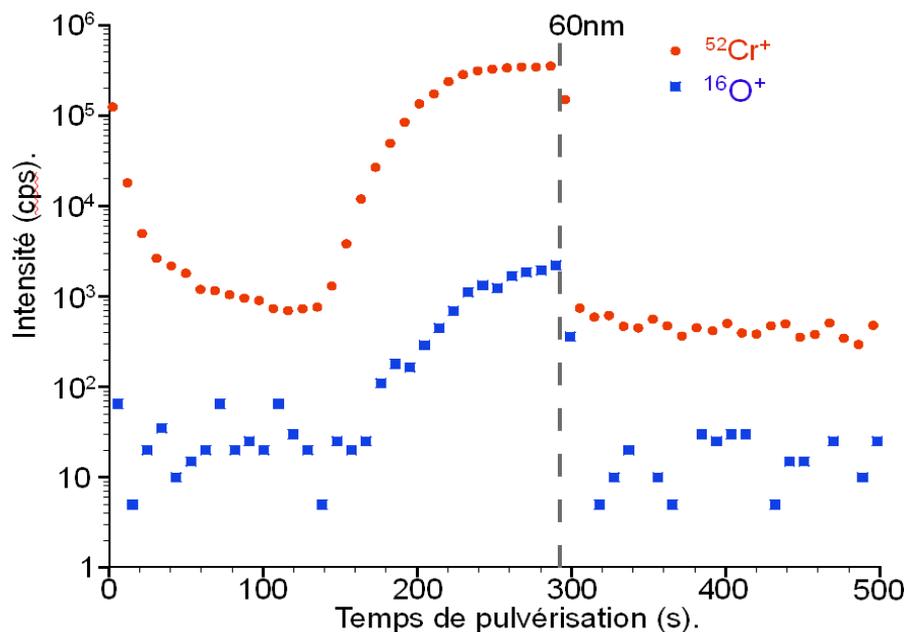
➔ Un dégazage d'une heure à 300°C  $\Rightarrow \frac{\Delta f}{f_0} < 5 \cdot 10^{-13} / \text{jour}$

➡ Les effets de diffusion.

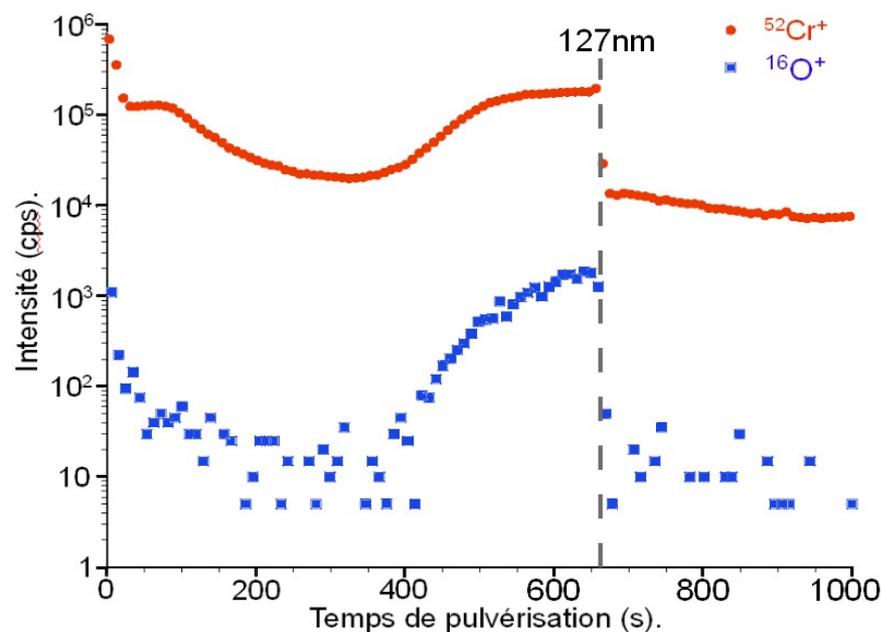
Résonateur = champ électrique faible

Activation thermique uniquement.

### Analyse SIMS avec 2 échantillons.



Lame métallisée recuite.



Résonateur qui a fonctionné qq jours.

➡ Pas de diffusion dans le quartz.

## Les contraintes mécaniques.

### ↳ Les électrodes.

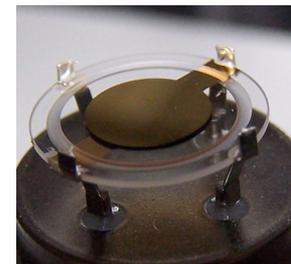
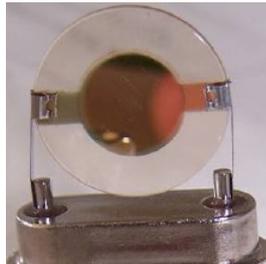
Coupe SC = contraintes mécaniques compensées (électrodes circulaires).

→ Effet des contraintes sur la fréquence de résonance négligeable.

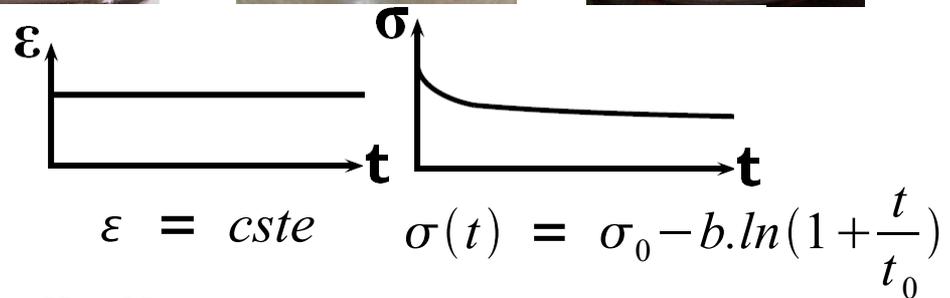
### ↳ La structure de montage.

Plusieurs montages :

- Montage manuel.
- Dispersion.
- Lame pré-contrainte.



Relaxation de contrainte.



Effet force-fréquence.

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{K_f \cdot N_0}{2h \cdot D} \cdot F$$

→ Variation de fréquence = f(relaxation des contraintes).

## Récapitulatif :

### ⇒ La contamination.

→ Phénomène provoquant au pire  $5.10^{-10}$  sur la durée de vie du résonateur.

### ⇒ Adsorption-désorption.

→ L'effet sur la fréquence est très faible et ne peut pas justifier  $\frac{\Delta f}{f_0} \approx 10^{-12} / jr$

**Transfert de masse →  $10^{-12}/jr$**

### ⇒ Dégazage du quartz.

→ Un dégazage d'une heure à 300°C  $\Rightarrow \frac{\Delta f}{f_0} < 5.10^{-13} / jour$

### ⇒ Les effets de diffusion.

→ Pas de diffusion dans le quartz.

### ⇒ Les électrodes.

→ Effet des contraintes sur la fréquence de résonance négligeable.

⇒ La structure **Structure de montage →  $10^{-10}$  à  $10^{-11} / jr$**

→ Variation de fréquence = f(relaxation des contraintes).



## Généralités.

Le résonateur à quartz de coupe SC.

## Le vieillissement.

Définition et sa problématique.

Les mécanismes à l'origine de cette dérive.

## Étude de la répartition des contraintes mécaniques.

Sensibilité de la fréquence aux forces extérieures.

## Étude expérimentale : le pré-vieillissement.

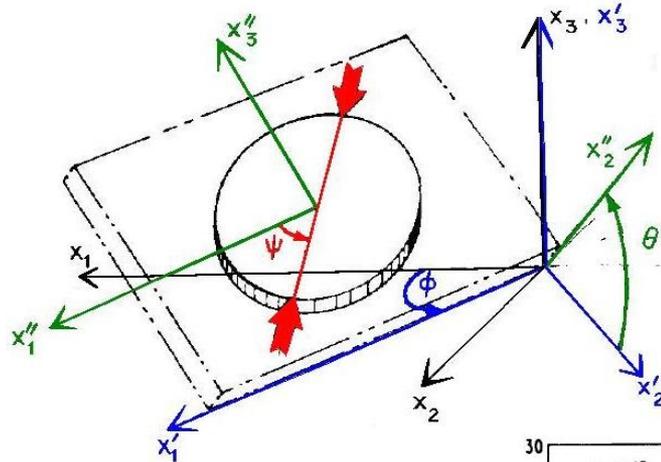
Plan d'expériences.

## Conclusion générale.

## ➡ Effet force-fréquence :

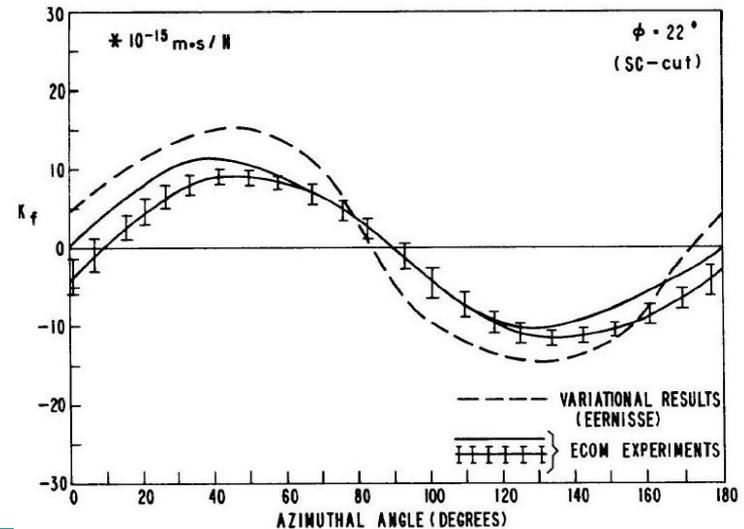
lien entre les forces extérieures radiales et la variation de fréquence.

Mesure de la variation de fréquence en fonction de l'azimut  $\Psi$ .

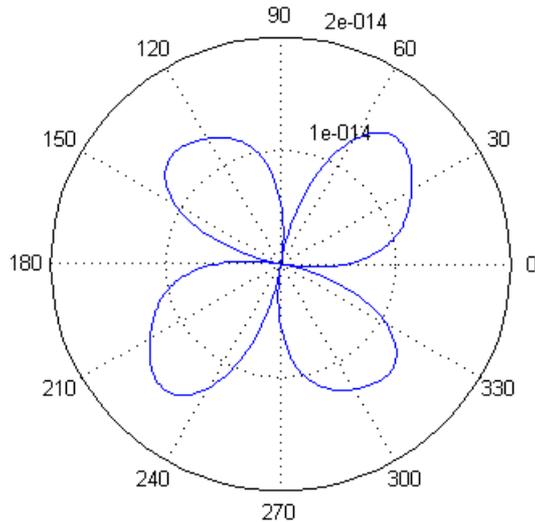


Coefficient force-fréquence :

$$K_f(\psi) = \frac{\Delta f}{f_0}(\psi) \cdot \frac{2h \cdot D}{F \cdot N_0}$$



## Propriétés du $K_f$ :



## Valeurs particulières :

	Valeur de $\psi$			
$K_{f_{MAX}}$	48°		228°	
$K_{f_{MIN}}$	134°		314°	
$K_f = 0$	-10°	82°	171°	262°

→ Positions où  $K_f = 0$  très précises.  
 $\pm 2^\circ$  d'erreur  $\Rightarrow$  9% de  $K_{f_{MAX}}$

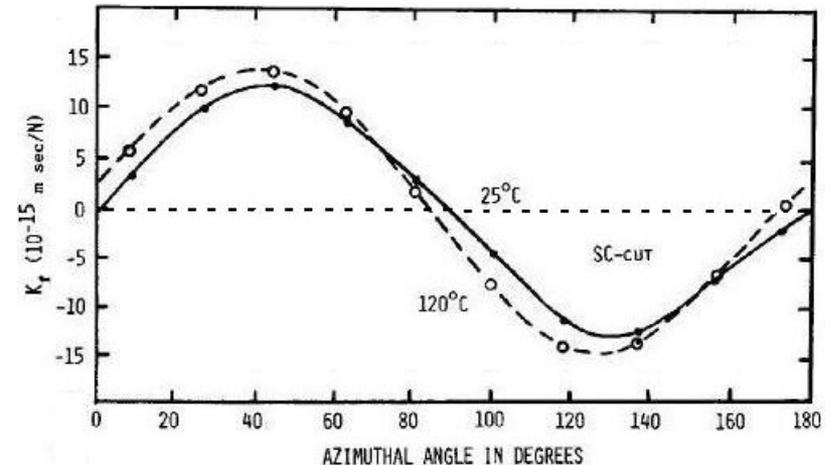


Repérage des faces

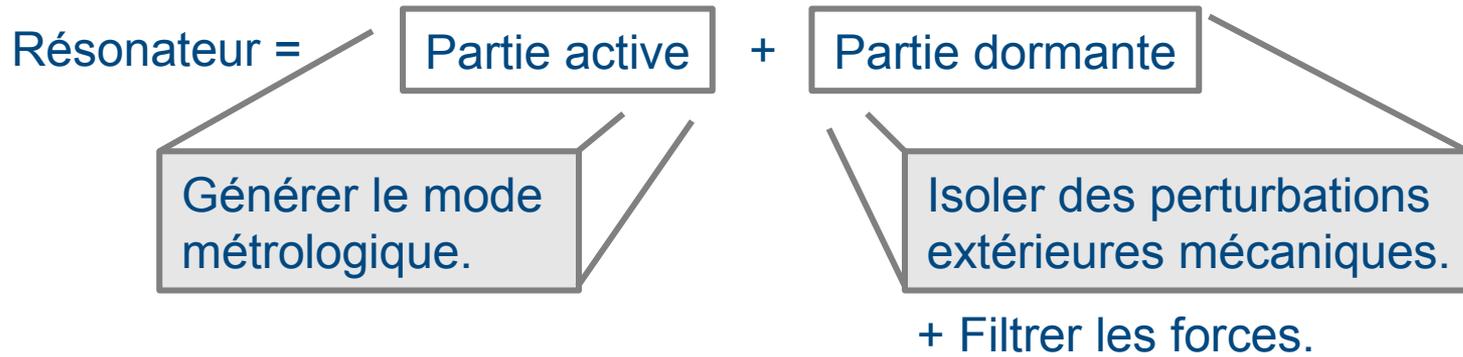
## Sensibilité thermique :

Température	valeur de $K_f$
25°C	$K_f(\psi_0)^1 = 0$
125°C	$K_f(\psi_0)^1 = 28\% \cdot K_{f_{MAX}}$

<sup>1</sup> $\psi_0$  azimut où  $K_f = 0$  à 25°C.

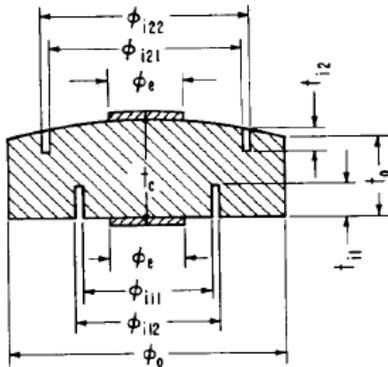
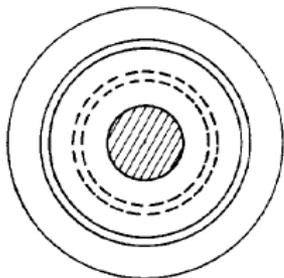


➡ Réduire l'effet force-fréquence : réduire les contraintes dans la partie centrale

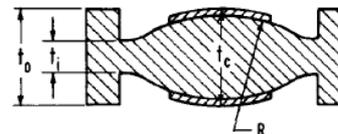
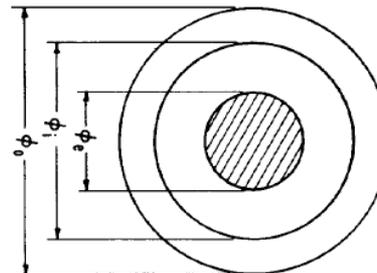


➡ Recherche bibliographique sur l'effet force-fréquence.

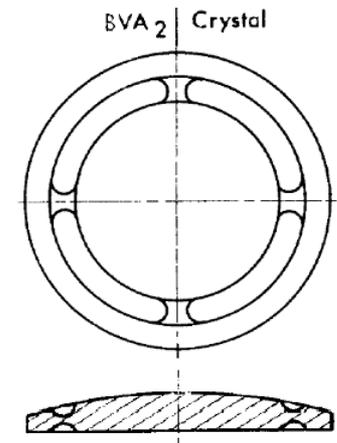
'grooved resonator'



'ring-supported resonator'



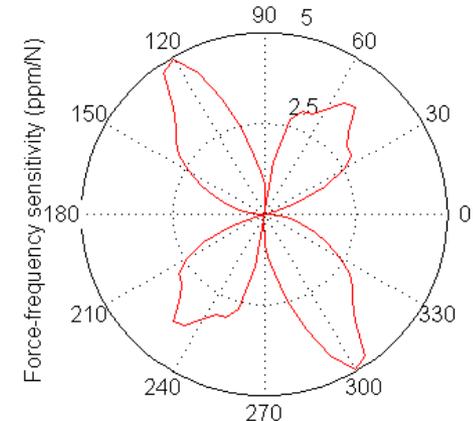
Résonateur BVA



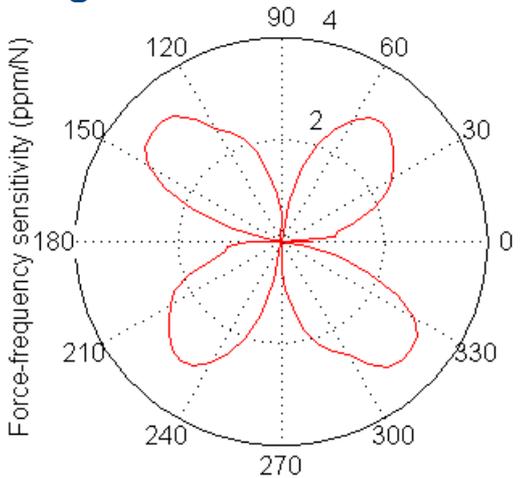
**Comprendre les spécificités de chaque type de lame.**

- 1 → Fabrication de plusieurs échantillons.
- 2 → Mesure de la sensibilité force-fréquence.
- 3 → Mesure de la sensibilité accélérométrique.

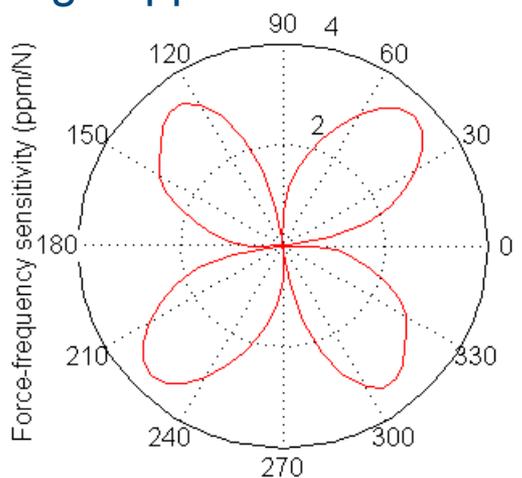
**Sensibilité force-fréquence.**



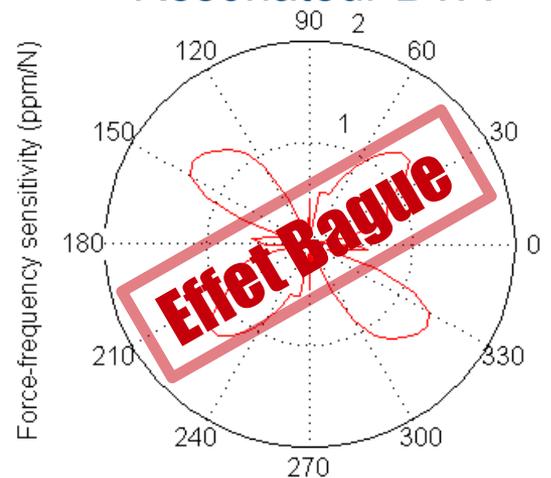
'grooved resonator'



'ring-supported resonator'



Résonateur BVA



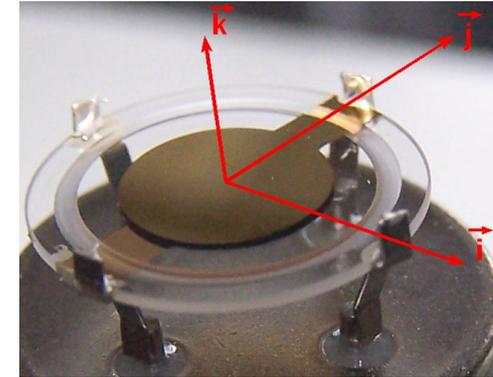
$K_{f_{MAX}}$  30 % de moins

Forme plus symétrique, plus adaptée à 4 points

$K_{f_{MAX}}$  72 % de moins

## ⇒ Sensibilité accélérométrique.

design	$\Gamma_x$	$\Gamma_y$	$\Gamma_z$	$ \Gamma $
Standard	$9,2 \cdot 10^{-10}$	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-9}$
Grooved	$7,8 \cdot 10^{-10}$	$5,4 \cdot 10^{-10}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$9,4 \cdot 10^{-10}$
Ring-supported	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$4,2 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$
BVA4 <sup>1</sup>	$9,2 \cdot 10^{-10}$	$5,4 \cdot 10^{-10}$	$8,3 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-9}$
BVA4 <sup>2</sup>	$6,5 \cdot 10^{-10}$	$6,4 \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$
BVA2 <sup>3</sup>	$9 \cdot 10^{-11}$	$7 \cdot 10^{-11}$	$9 \cdot 10^{-11}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$
BVA2 <sup>3</sup> bi-conv	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-11}$	$4,4 \cdot 10^{-11}$



Vecteur  $\vec{\Gamma}$  :

$$\vec{\Gamma} = \Gamma_x \vec{i} + \Gamma_y \vec{j} + \Gamma_z \vec{k}$$

$$\rightarrow |\Gamma| = \sqrt{\Gamma_x^2 + \Gamma_y^2 + \Gamma_z^2}$$

<sup>1</sup>La structure de montage est alignée dans la direction des ponts.

<sup>2</sup>L'angle entre les clips et la direction des ponts est de 45°.

<sup>3</sup>BVA<sub>2</sub> a des électrodes non-adhérentes alors que le BVA<sub>4</sub> est métallisé.

## ⇒ Remarques :

- effet de la rainure :  $\Gamma_z$  considérablement réduit ( $\approx 80$  à  $90\%$ )
- $|\Gamma|$  du BVA<sub>2</sub> est 85% plus faible que  $|\Gamma|$  du BVA<sub>4</sub>.
- BVA<sub>4</sub> : montage à 45° des ponts = effet de symétrisation sur  $\Gamma_x$  et  $\Gamma_y$ .

## ⇒ Interprétations :

- Symétrisation de la sensibilité force-fréquence pour les résonateurs rainurés.
- $\Gamma_z$  fortement réduit par la rainure.

La rainure = 160 $\mu$ m de quartz  $\Rightarrow$  concentration de contraintes mécaniques.  
 $\Rightarrow$  concentration du moment de flexion de la lame.

- Sensibilité force-fréquence nettement plus faible pour le BVA.
- Symétrisation de  $\Gamma_x$  et  $\Gamma_y$  par le montage à 45° des ponts sur le BVA<sub>4</sub>.

Effet Bague : partie dormante  $\Rightarrow$  bague libre, tenue en 4 points, les ponts.  
 $\Rightarrow$  souplesse entre les ponts.

- $|\Gamma|$  fortement réduit du BVA<sub>2</sub> par rapport au BVA<sub>4</sub>.

BVA2 : montage sur ressort dans une bague rigide  $\Rightarrow$  rôle d'amortisseur.

Sensibilité accélérométrique & vieillissement liés par les contraintes mécaniques.

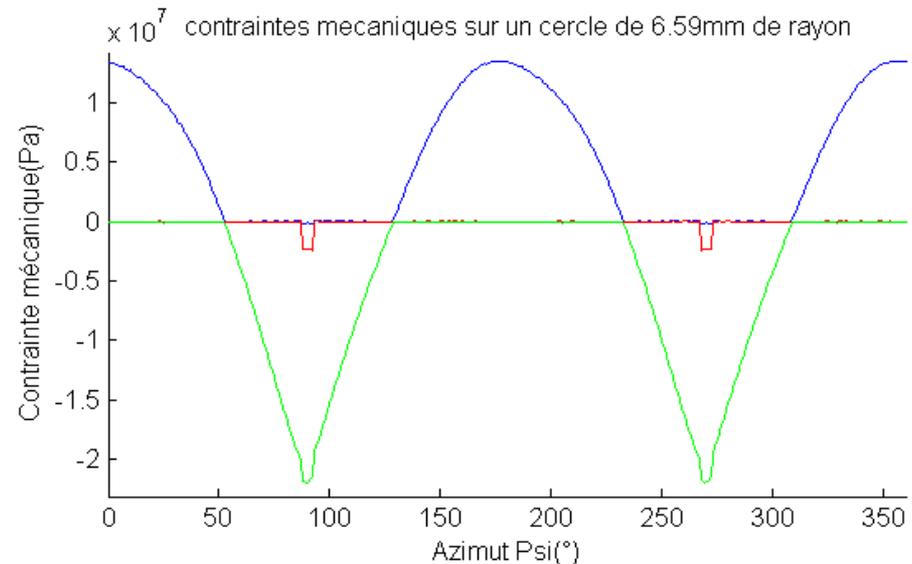
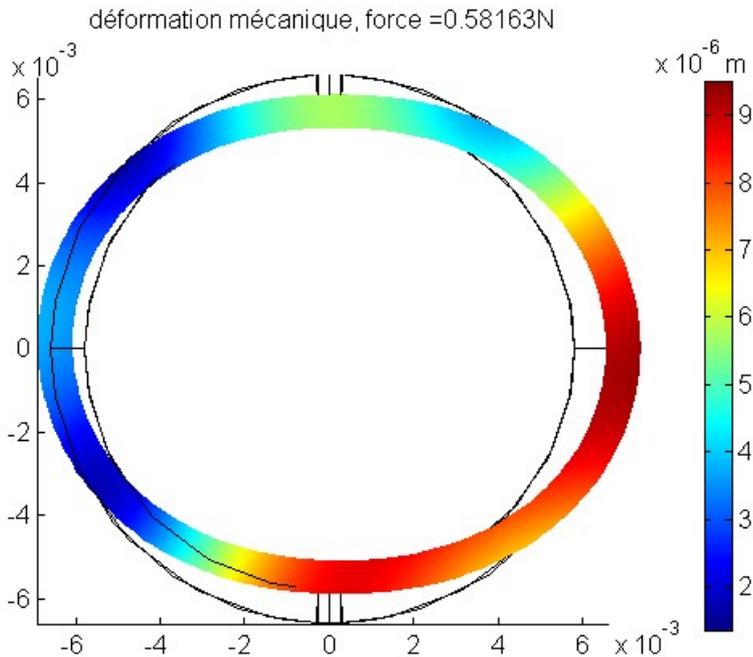
La sensibilité accélérométrique et le vieillissement du BVA<sub>2</sub>.

$\rightarrow$  10 fois plus faible que celui d'un résonateur standard.

➡ Étude des contraintes mécaniques  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  et  $\sigma_z$  à l'aide de MEF.

Objectif : étudier l'effet bague et observer son influence sur les contraintes mécaniques dans la partie active.

Bague de quartz soumise à 2 forces opposées.



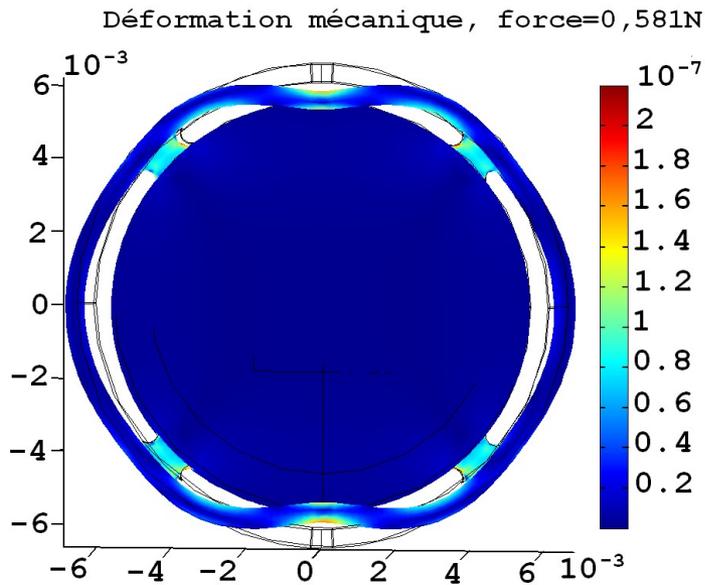
( $\sigma_x$  en bleu,  $\sigma_y$  en rouge et  $\sigma_z$  en vert.)

La bague a tendance à devenir ovale.



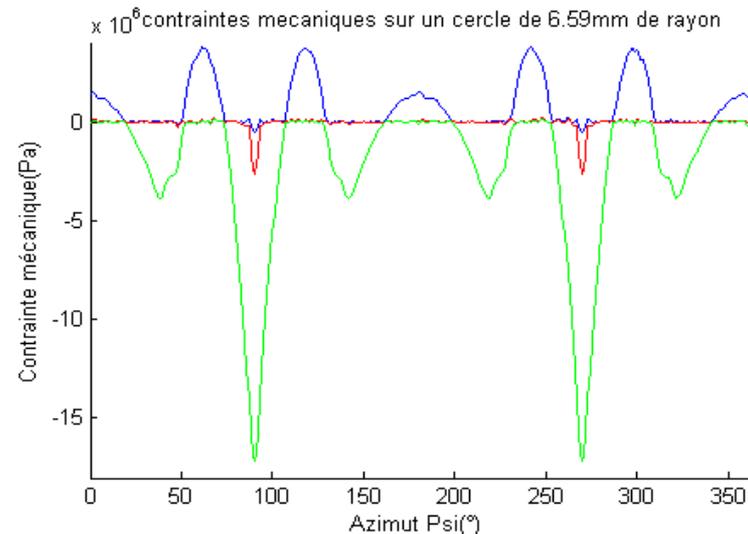
Continuité entre  $\sigma_x$  et  $\sigma_z$   
(pas de concentration).

Le résonateur BVA soumis à 2 forces opposées.



- Déformation de la bague par partie.
- Continuité entre  $\sigma_x$  et  $\sigma_z$  formée par des ventres.

⇒ Confirme l'interprétation des mesures.



( $\sigma_x$  en bleu,  $\sigma_y$  en rouge et  $\sigma_z$  en vert.)

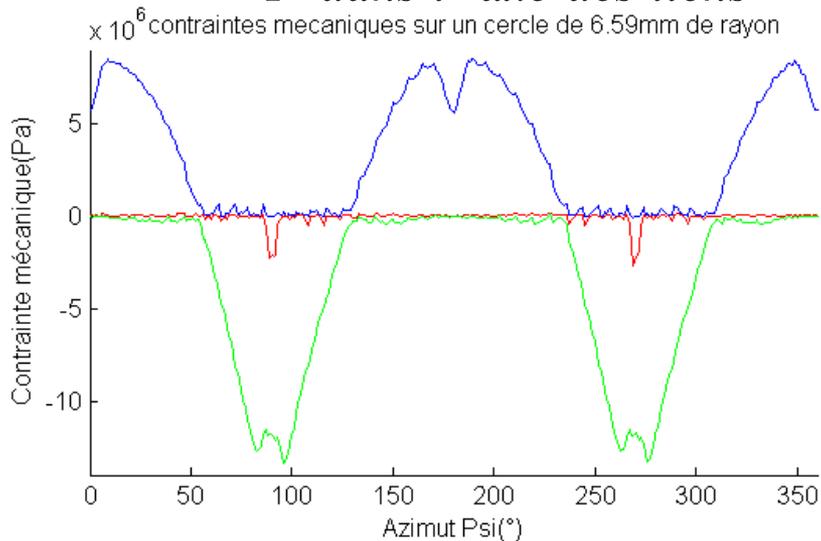
↳ Observations et interprétations.

Nouveau résinateur.

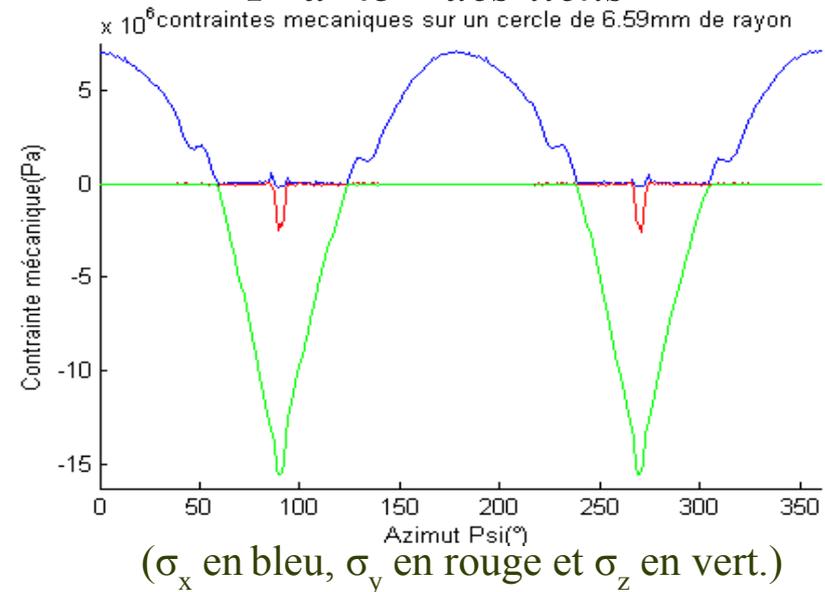
Bague extérieure + Partie active

**GEOMETRIE CONFIDENTIELLE.**

$\vec{F}$  dans l'axe des liens

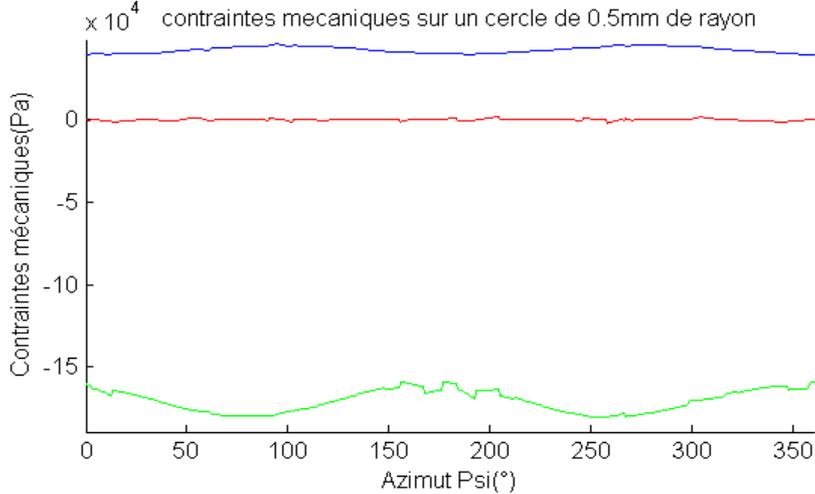


$\vec{F}$  à 45° des liens

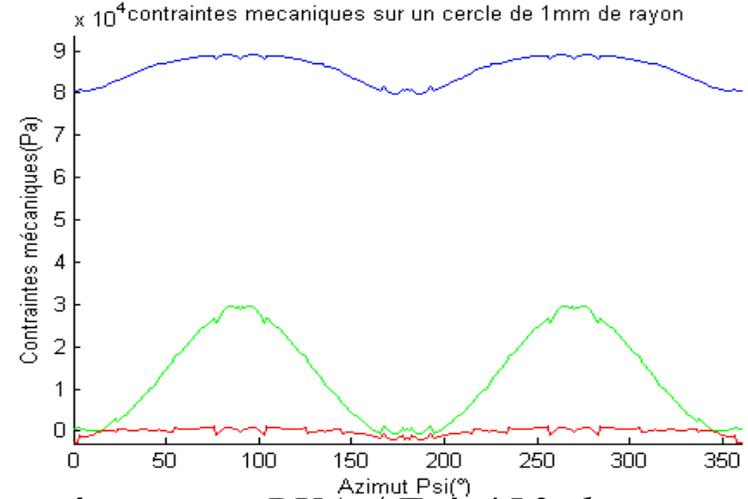


→ La bague extérieure se comporte comme la bague libre.

## ↳ Contraintes mécaniques dans la partie active.



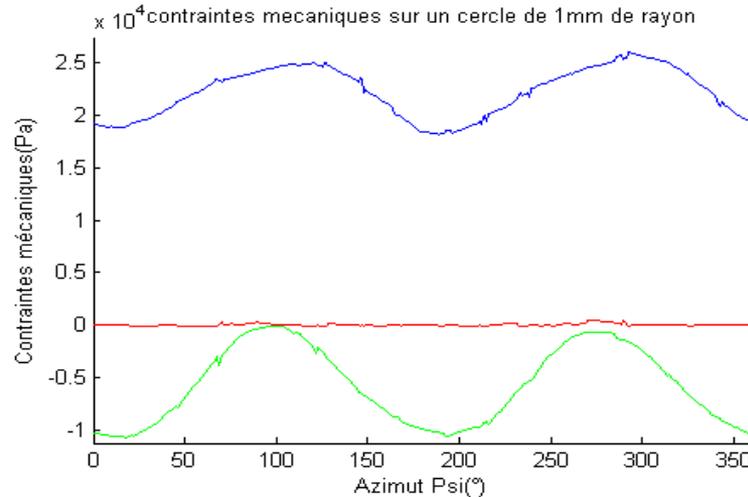
*résonateur standard.*



*résonateur  $BVA_4$  ( $\vec{F}$  à  $45^\circ$  des ponts)*

*nouveau résonateur  
( $\vec{F}$  à  $45^\circ$  des liens)*

**-37 % sur  $\sigma_x$**   
**-96 % sur  $\sigma_z$**



( $\sigma_x$  en bleu,  
 $\sigma_y$  en rouge  
 $\sigma_z$  en vert.)

➡ Validité du coefficient force-fréquence : uniquement sur une lame standard.

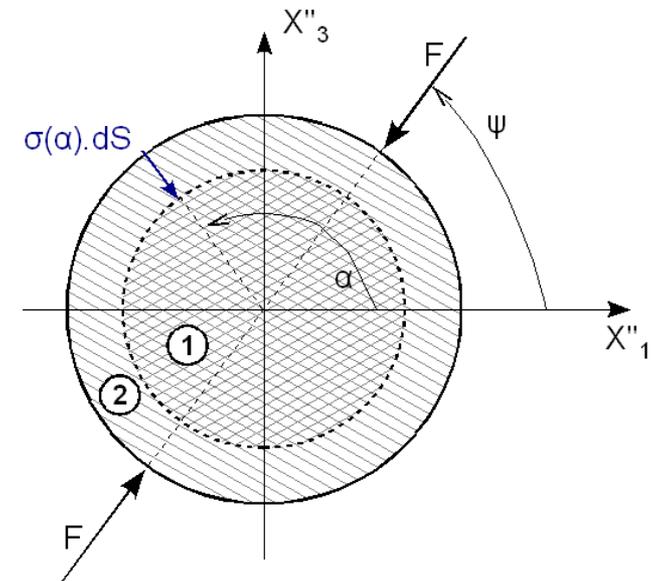
Calcul de la sensibilité force-fréquence : modèle mixte.

① Partie active : modèle analytique  $K_f$ .

② Partie dormante : FEM.

→ Calcul de  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  et  $\sigma_z$ .

$$F_n(z, \alpha, \psi) = \sigma_x(z, \alpha, \psi) \cdot \cos(\alpha) dS + \sigma_z(z, \alpha, \psi) \cdot \sin(\alpha) dS$$



$$\rightarrow \frac{\Delta f}{f_0}(\psi) = \int_{\alpha=0}^{\pi} \int_{z=0}^e K_f(\alpha) \frac{F_n(z, \alpha, \psi) \cdot N_0}{e \cdot D} dz d\alpha$$

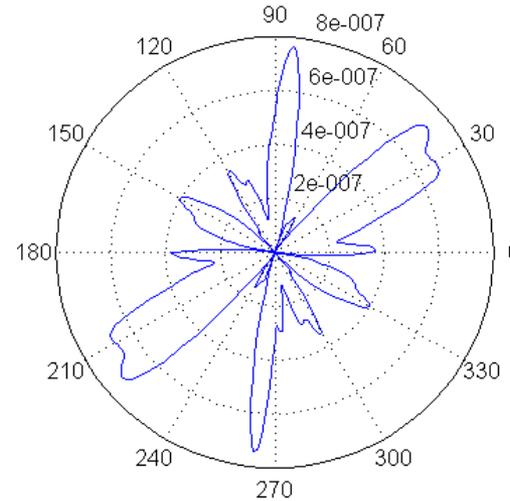
## ↳ Résultats de la simulation :

$$\rightarrow \frac{\Delta f}{f_{0MAX}} = 7,8 \cdot 10^{-7} / N$$

Résonateur standard :

$$\frac{\Delta f}{f_{0MAX}} = 5 \cdot 10^{-6} / N$$

→ **-84%**



## ↳ Fabrication des prototypes :

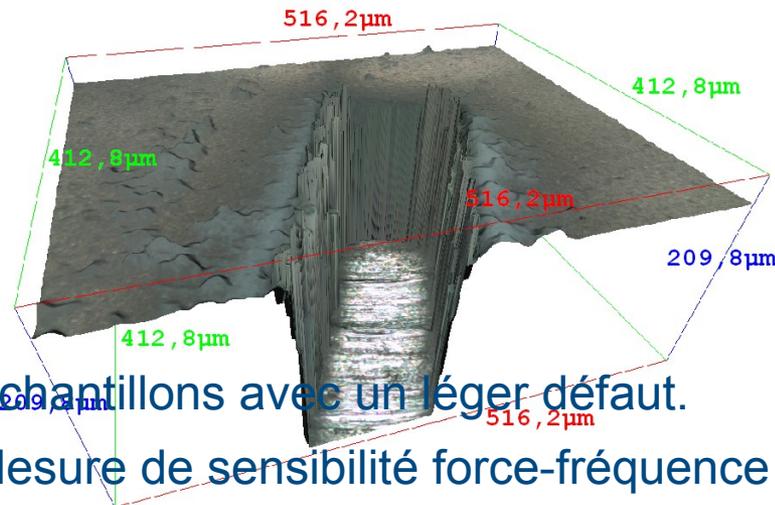
Deep RIE.

170 $\mu$ m, progrès rapide.

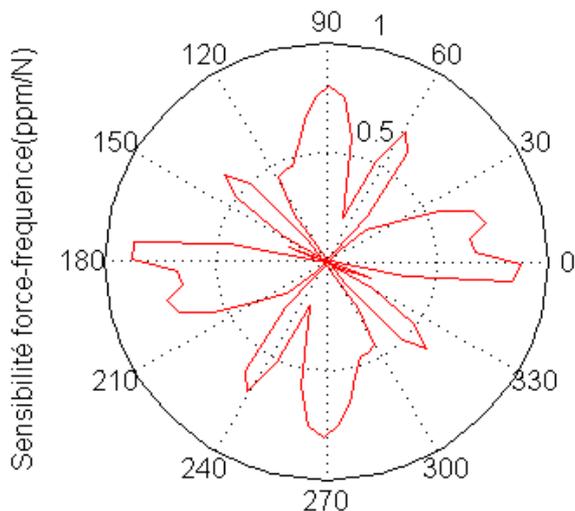
Laser femto-second :

Usinage ultrasonore. → Échantillons avec un léger défaut.

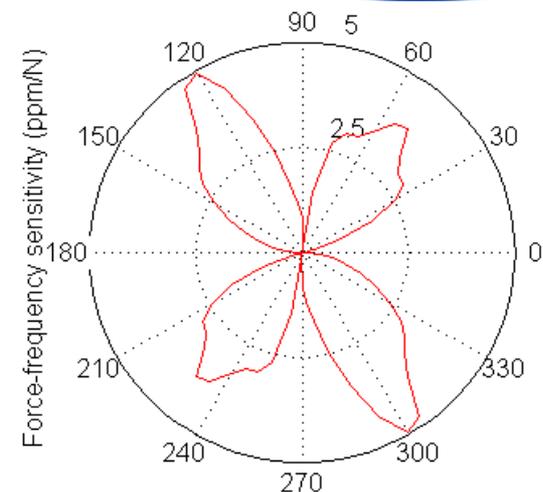
→ Mesure de sensibilité force-fréquence possible.



↳ Mesure de la sensibilité force-fréquence.



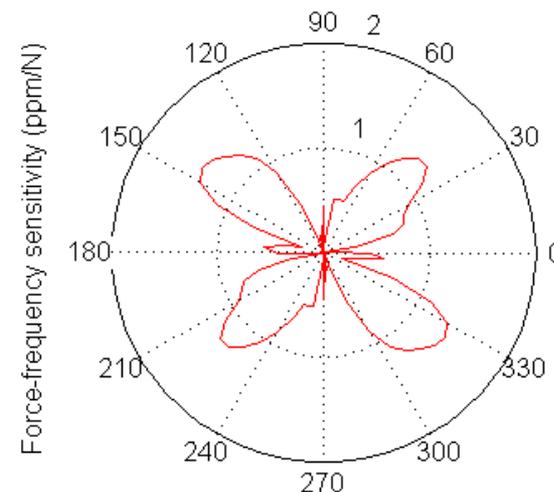
$$\frac{\Delta f}{f_0 \text{ MAX}} = 8.10^{-7} / N$$



*Résonateur standard*

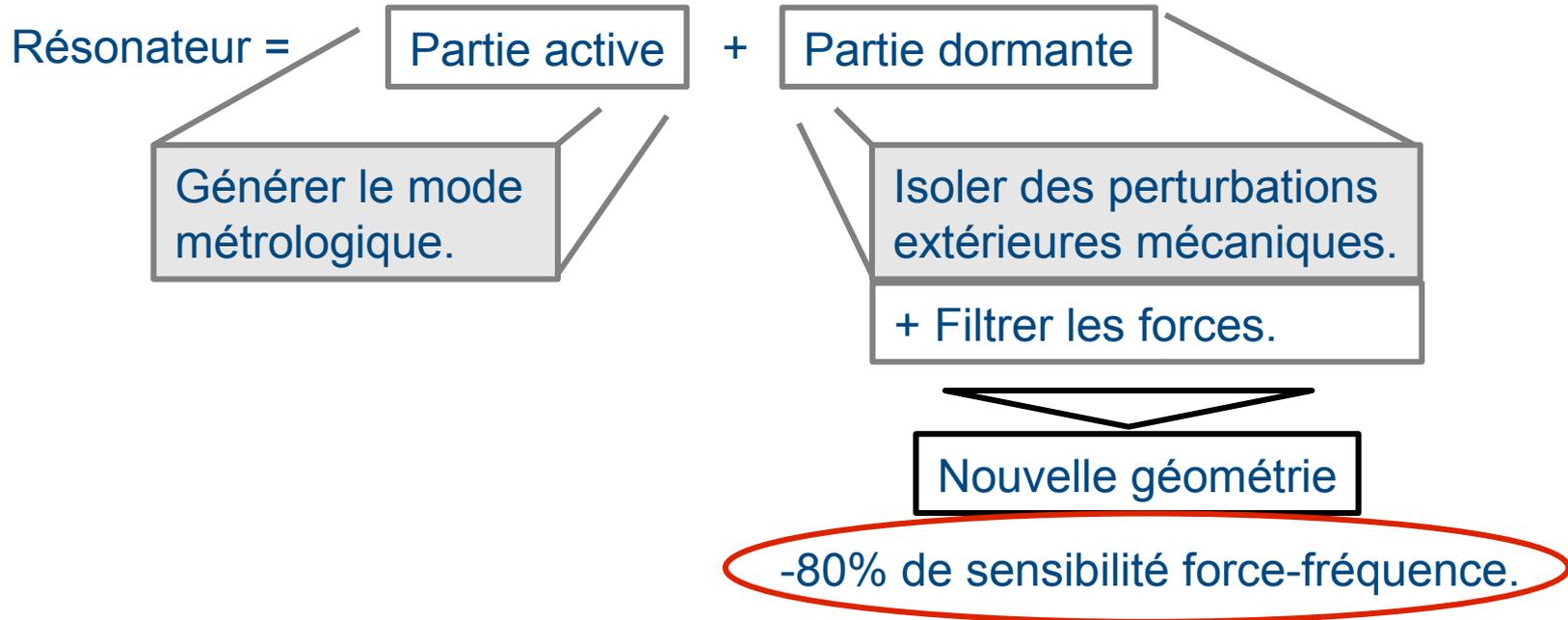
-80% par rapport au résonateur standard

-42% par rapport au BVA.



*Résonateur BVA*

 Conclusions.



Fiabilisation de la fabrication : pré-série

Mesure de la sensibilité accélérométrique.  
Mesure du vieillissement. } = **BVA, voire meilleur.**



## Généralités.

Le résonateur à quartz de coupe SC.

## Le vieillissement.

Définition et sa problématique.

Les mécanismes à l'origine de cette dérive.

## Étude de la répartition des contraintes mécaniques.

Sensibilité de la fréquence aux forces extérieures.

## Étude expérimentale : le pré-vieillissement.

Plan d'expériences.

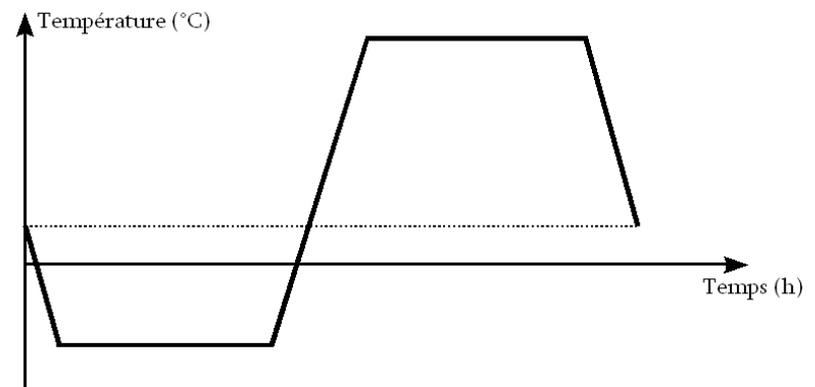
## Conclusion générale.

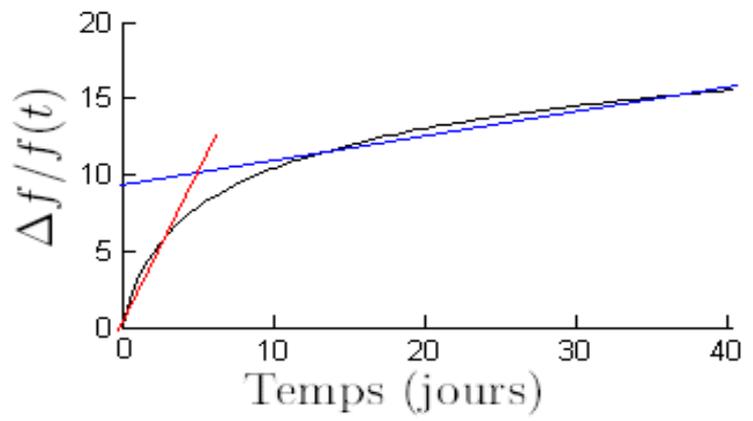
➔ Le pré-vieillissement :



- ➔ • Conditions initiales des phénomènes physiques.
- État transitoire = instabilité de la fréquence.

- Cycle thermique.
- Défini empiriquement.
- Stabiliser la fréquence de résonance.





- Vieillissement nominal
- Vieillissement initial.

→ V.I. fort ∈ État transitoire.

Étudier le pré-vieillissement. → Informations sur les phénomènes physiques  
 | Connaissance du vieillissement.  
 | Réduction du vieillissement initial.

Étude de l'effet des principaux paramètres du pré-vieillissement.

- Résonateurs neufs.
- Pré-vieillissement : bcp paramètres.
- Durée de l'étude.

} → Minimiser le nombre d'essais.  
 → Maximiser les informations.

Organisation rigoureuse des essais.

⇒ L'expérimentation : Établir une relation entre  $y$  et les facteurs causaux  $\{x_i\}$

Ensemble d'essais élémentaires  $i$  (ou facteur  $j$  est fixé à un niveau).

$$Y_i = f(X_{ij})$$

Systeme d'équations  $Y = f(X)$ .

- Effet des facteurs.
- Interactions entre facteurs.



Erreur : organiser les expériences à l'intuition.

⇒ Ensemble d'essais organisé méthodiquement = plan d'expériences

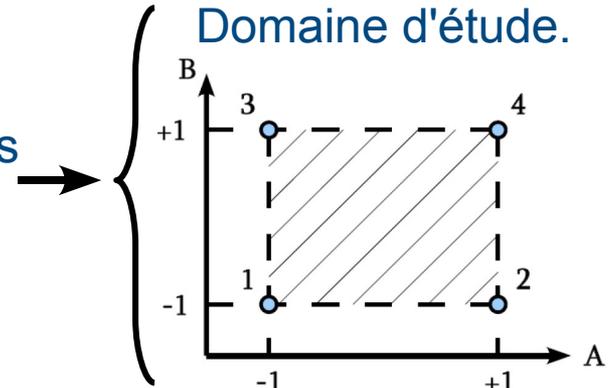
Ne faire varier qu'un facteur à la fois.  **Plan factoriel complet.**

⇒ Plan factoriel complet: plan 2<sup>k</sup>.

Ex : 2 facteurs à 2 niveaux. (plan 2<sup>2</sup> = 4 essais)

N°essai	A	B	A.B	Réponse
1	-1	-1	+1	y <sub>1</sub>
2	+1	-1	-1	y <sub>2</sub>
3	-1	+1	-1	y <sub>3</sub>
4	+1	+1	+1	y <sub>4</sub>

• Choix des niveaux



↪  $y = a_0 + a_A x_A + a_B x_B + a_{AB} x_A x_B$

$a_0$  : la réponse moyenne (centre du domaine d'étude).

$a_A$  (resp  $a_B$ ) : effet moyen du facteur A (resp B).

$a_{AB}$  : interaction entre le facteur A et B (dite d'ordre 2).

Ex : 5 facteurs à 2 niveaux (plan 2<sup>5</sup> = 32 essais).

10 interactions d'ordre 2 (entre 2 facteurs).

10 interactions d'ordre 3 (entre 3 facteurs).

5 interactions d'ordre 4 (entre 4 facteurs).

1 interaction d'ordre 5 (entre 5 facteurs).

Grand nombre d'essais.

Interactions d'ordre 3 et plus.  
compliquées à interpréter

⇒ Plan factoriel fractionnaire : plan  $2^{k-p}$ .

Étudier les effets des k facteurs avec  $2^p$  fois moins d'essais.

↪ Interaction remplacée par un facteur.

Ex : 3 facteurs à 2 niveaux (plan  $2^{3-1} = 4$  essais).

→ 4 équations de la forme :  $y = l_0 + l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3 x_3$

Plan complet  $\Rightarrow y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_{123} x_1 x_2 x_3$

$$\left. \begin{array}{l} l_0 = a_0 + a_{123} \\ l_1 = a_1 + a_{23} \\ l_2 = a_2 + a_{31} \\ l_3 = a_3 + a_{12} \end{array} \right\} \text{Contraste} = \text{effet} + \text{interaction}$$

**Difficulté d'interprétation** → extraire l'effet des facteurs étudiés.

- Interaction d'ordre 3 ou plus.
  - Interaction entre des facteurs sans lien physique.
- } → Interaction négligeable

(Démarche pratique pour élaborer un plan factoriel fractionnaire.)

→ Le plan d'expériences sur le pré-vieillessement.

● Objectif :

- Améliorer la connaissance du pré-vieillessement et du vieillissement.
- Expliquer le vieillissement initial plus ou moins fort.

→ La réponse du plan : le vieillissement initial (après 10 jours).

● Besoins et moyens techniques : Plan  $2^{7-4} = 8$  essais.

(Statistique raisonnable : 4 répétitions.)

32 résonateurs neufs et non pré-vieillis.

32 oscillateurs mannequins

Banc de mesure automatisé (référence horloge atomique).

1 étuve programmable et du matériel de mesure.

→ **Plan  $2^{7-4}$  : 7 facteurs étudiés au maximum.**

• Domaine d'étude :

Facteur
Température palier haut
Température palier bas
Durée palier haut
Durée palier bas
Montée/descente
Répétition
Vibration

Niv-1 = 70°C, en dessous du PI  
Niv+1 = 95°C en dessus du PI.

Niv-1 = 0°C.

Niv+1 = 35°C.

Niv-1 = 1h

Niv+1 = 6h valeurs assez éloignées.

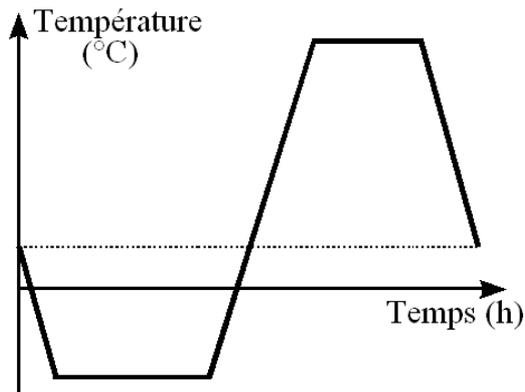
Max = 180°C/h, limite de l'étuve  
Min = 50°C/h, < 3.Max.

Niv-1 = 2, le cycle est répété.

Niv+1 = 10, volontairement important.

Niv-1 = aucune

Niv+1 = 3500Hz, fréquence de rotation du moteur équipé d'une masselotte



- Matériels.

Banc de mesure piloté par informatique (**sauvegarde des données**).

Onduleur pour **s'affranchir des coupures électriques**.

Oscillateurs mannequins **pré-vieillis** et garantissant une stabilité de  **$10^{-12}$ /jours**.

Résonateurs : + Meilleur quartz du marché (**Gemma HQ**).

+ process spatial de TEMEX ( $f_0 = 10\text{MHz} \pm 100\text{Hz}$ ).

+ Dégazage à **280°C** pendant **20h**.

+ Fermeture Coldweld à  **$4 \cdot 10^{-8}$ mbar**.

	$T_{P.I.}$ (°C)	$R_{motionelle}$ ( $\Omega$ )	$Q$ (million)
Mini	83, 2	74, 8	1, 11
Moyenne	86, 5	77, 7	1, 16
Maxi	89	82	1, 21

- Construction du plan : les essais.

Choix des remplacements des interactions par des facteurs.

$l_4 = a_4 + a_{12}$  Répétition + interaction (T°C palier bas, T°C palier haut).

$l_4 = a_4$  si  $a_{12}$  faible  $\Leftrightarrow$  pas d'interaction,  $a_1$  ou  $a_2$  faible.

$l_5 = a_5 + a_{31}$  Durée palier haut + interaction (vitesse ch/ref, T°C palier bas).

$l_5 = a_5$  si  $a_{31}$  faible  $\Leftrightarrow$  pas d'interaction,  $a_3$  ou  $a_1$  faible.

$l_6 = a_6 + a_{23}$  Durée palier bas + interaction (T°C palier haut, vitesse ch/ref).

$l_6 = a_6$  si  $a_{23}$  faible  $\Leftrightarrow$  pas d'interaction,  $a_2$  ou  $a_3$  faible.

$l_7 = a_7 + a_{123}$  Vibration méca + interaction (T°C palier bas, T°C palier haut, vitesse ch/ref).

$l_7 = a_7$  si  $a_{123}$  faible  $\Leftrightarrow$  pas d'interaction,  $a_1$  ou  $a_2$  ou  $a_3$  faible.

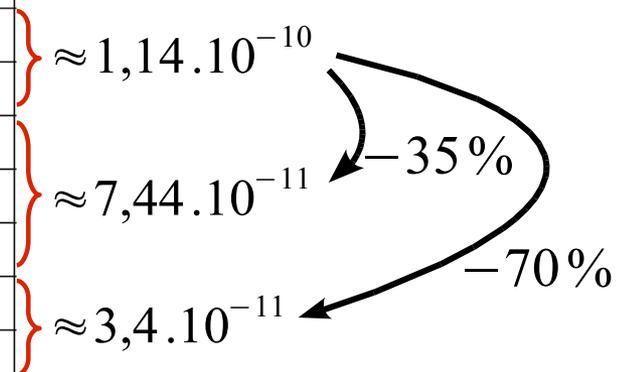
$\rightarrow$  Vérifier que  $a_1$  ou  $a_2$  soit faible.

Durée des essais :

N° essai	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6	N°7	N°8	
Durée	127h	16h	15h	28h	44h	22h	17h	148h	=17jrs9h
Vibration	non	oui	oui	non	oui	non	non	oui	

● Résultats : effet moyen sur le vieillissement initial (10 jours).

Contraste	Effet Moyen	paramètre
Facteur 7	$1,158.10^{-10}$	vibration mécanique
Facteur 3	$1,130.10^{-10}$	vitesse de chauffage/refroidissement
Facteur 4	$7,8.10^{-11}$	répétition du cycle
Facteur 5	$7.64.10^{-11}$	durée du palier haut
Facteur 2	$6.871.10^{-11}$	température du palier haut
Facteur 6	$3.918.10^{-11}$	durée du palier bas
Facteur 1	$2.886.10^{-11}$	température du palier bas



1<sup>er</sup> groupe : évidence du rôle des contraintes mécaniques.

Vibrations mécaniques → fatigue des clips

vitesse de chauffage/refroidissement → dilatation thermique → fatigue des clips

2<sup>eme</sup> groupe : rôle des contraintes mécaniques et de l'activation thermique.

Répétition → nombre cycle de dilatation thermique → fatigue des clips

T°C et la durée du palier haut → énergie thermique → activation thermique de la relaxation et de quelques transferts de masse.

3<sup>eme</sup> groupe : rôle mineur du palier bas. (mais pas négligeable.)

T°C et durée du palier bas → ni activation thermique ni fatigue des clips.

- Résultats : effet moyen sur le vieillissement nominal (150 jours).

Contraste	Effet Moyen	paramètre
Facteur 7	$5,55 \cdot 10^{-12}$	vibration mécanique
Facteur 6	$3,89 \cdot 10^{-12}$	durée du palier bas
Facteur 5	$3,35 \cdot 10^{-12}$	durée du palier haut
Facteur 3	$2,76 \cdot 10^{-12}$	vitesse de chauffage/refroidissement
Facteur 1	$2,65 \cdot 10^{-12}$	température du palier bas
Facteur 4	$2,13 \cdot 10^{-12}$	répétition du cycle
Facteur 2	$4,15 \cdot 10^{-13}$	température du palier haut

Effet quasi identique pour chaque facteur

Sauf :  
Vibrations mécaniques  
T°C du palier haut

→ Difficile d'en tirer une conclusion.

Le pré-vieillessement influence peu le vieillissement nominal.

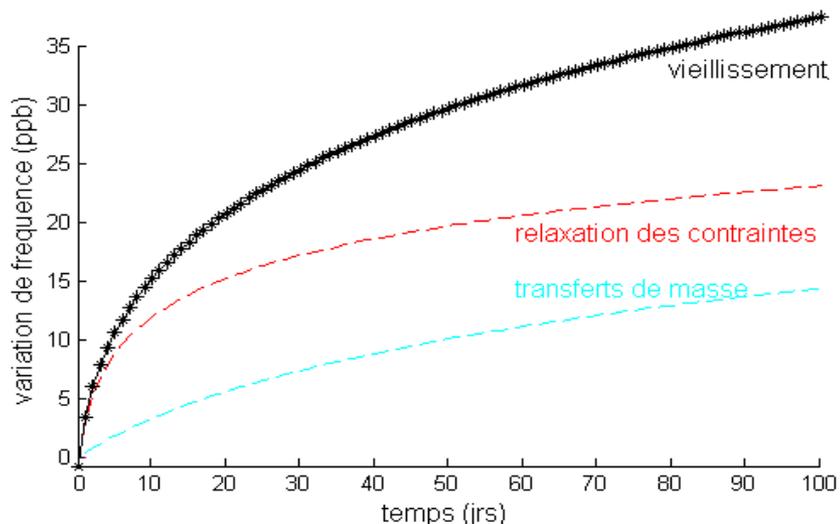
Le vieillissement nominal est le reflet de la qualité de fabrication.

⇒ Conclusions.

Vibrations mécaniques ⇒ ↗ Efficacité du pré-vieillissement

Pistes d'amélioration : Fréquence, amplitude, cycle de vibrations.

- ▶ Hiérarchie entre la relaxation des contraintes mécaniques et les transferts de masse.
- ▶ Contraintes mécaniques → Cause du vieillissement initial.
- ▶ Transferts de masse → Activés thermiquement et quasi-linéaire.



Concevoir une structure de montage :  
Matériaux, forme, montage.  
→ Annuler la relaxation des contraintes.

Sans relaxation de contraintes :  
→ Vieillesissement = transferts de masse.



## Généralités.

Le résonateur à quartz de coupe SC.

## Le vieillissement.

Définition et sa problématique.

Les mécanismes à l'origine de cette dérive.

## Étude de la répartition des contraintes mécaniques.

Sensibilité de la fréquence aux forces extérieures.

## Étude expérimentale : le pré-vieillissement.

Plan d'expériences.

## Conclusion générale.

## Étude des contraintes mécaniques

Géométrie de lame :



→ Faible sensibilité force-fréquence  
 $f_0$  moins sensible à la relaxation.

## Étude du pré-vieillessement.

+ Vibrations  
+ Vitesse ch/ref  
+ Répétition  
+ Énergie thermique (palier haut)

} ↑ Efficacité du pré-vieillessement.

### Vieillessement initial

→ Relaxation des contraintes mécaniques.

### Vieillessement nominal

→ Qualité de fabrication & du montage.

## Amélioration du vieillissement nominal :

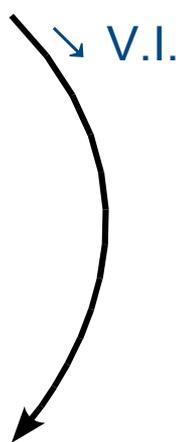
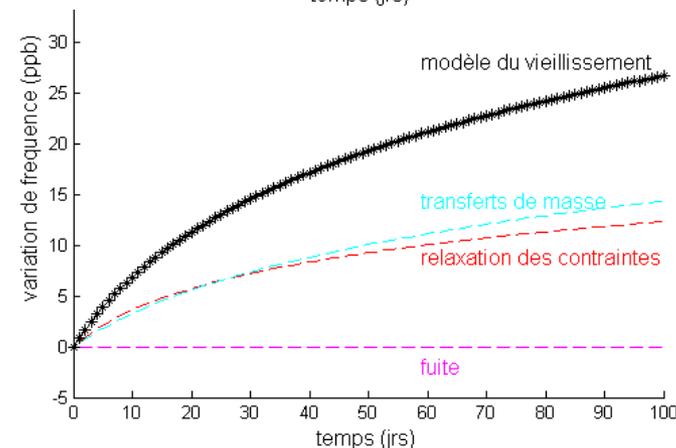
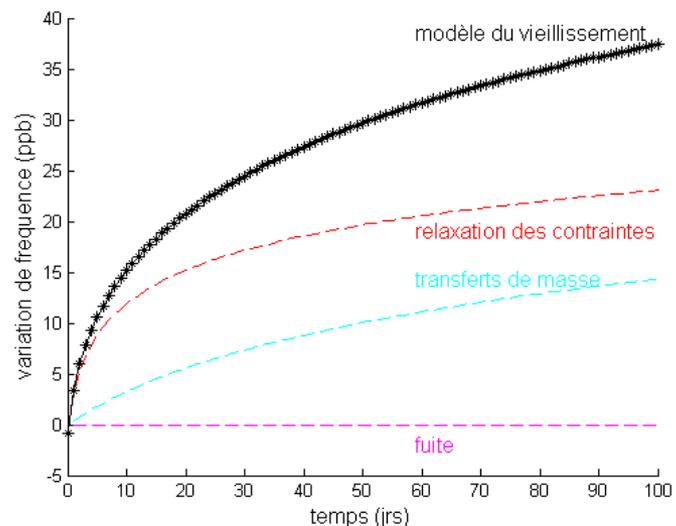
Améliorer l'efficacité du cycle de pré-vieillessement (prédiction plus fiable):

→ Optimisation des vibrations mécaniques (amplitude, fréquence : cycle?).

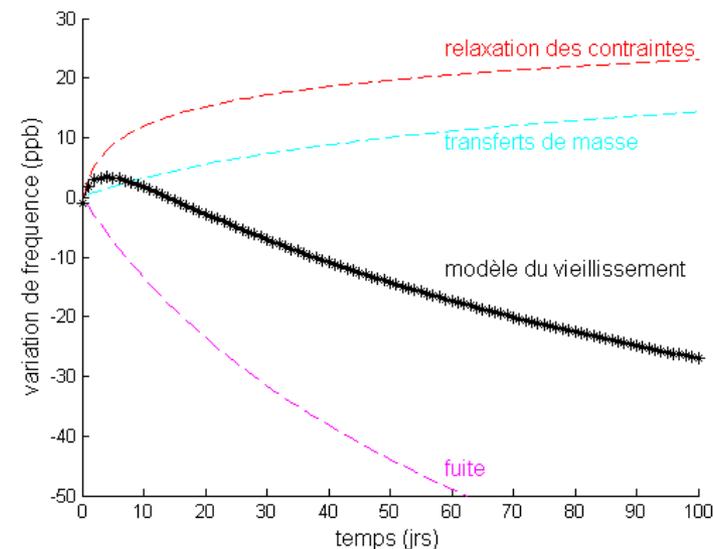
Réduire les contraintes mécaniques dans la partie active :

→ Conception de la suspension (ex : BVA et géométrie proposée).

$$\Delta f/f(t) = \underbrace{A_1 \cdot \log(b_1 t + 1)}_{\text{relaxation des contraintes}} + \underbrace{A_2 \cdot \log(b_2 t + 1)}_{\text{transfert de masse}} + \underbrace{A_3 \cdot \log(b_3 t + 1)}_{\text{fuite du boîtier}}$$



## Fuite du boîtier :



MERCI pour votre attention.