

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

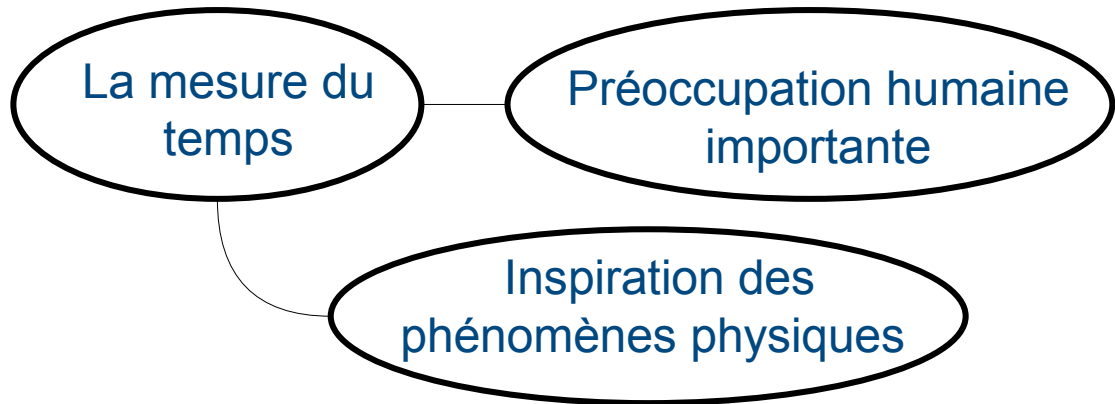
femto-st
sciences & technologies

TEMEX 

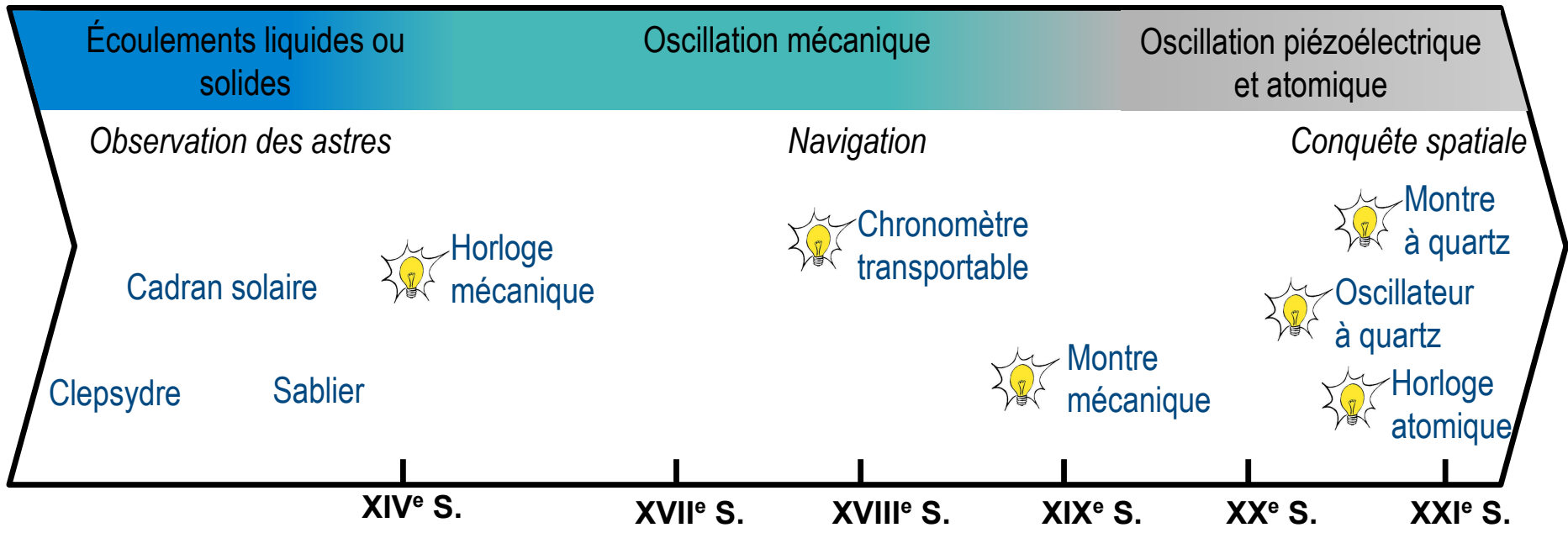


cultiver l'innovation,
de la recherche fondamentale
au partenariat industriel

www.femto-st.fr



- 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	5×10^{-7}	2×10^{-8}	5×10^{-9}	2×10^{-10}	2×10^{-10}	5×10^{-11}
Stabilité / température (Plage de T, °C)	5×10^{-7} (-55 à +85)	3×10^{-8} (-55 à +85)	1×10^{-9} (-55 à +85)	3×10^{-10} (-55 à +68)	5×10^{-10} (-55 à +85)	2×10^{-11} (-28 à +65)
Stabilité, $\sigma_y(\tau)$ ($\tau = 1s$)	1×10^{-9}	3×10^{-10}	1×10^{-12}	3×10^{-12}	5×10^{-12}	5×10^{-11}
Volume (cm ³)	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.

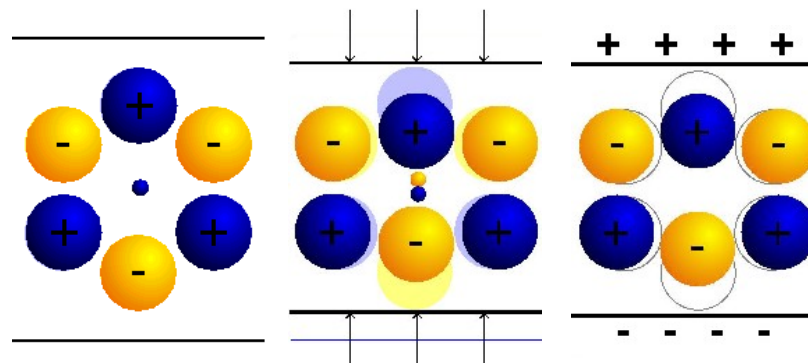
Sensibilité de la fréquence aux forces extérieures.

Étude expérimentale : le pré-vieillissement.

Plan d'expériences.

Conclusion générale.

La piézoélectricité



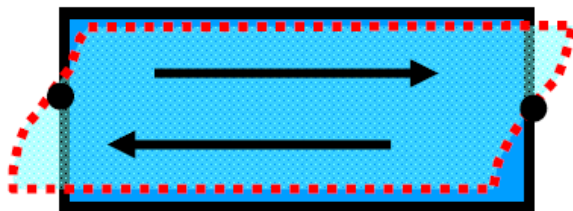
Lien entre déformation mécanique et charges électriques.

Résonateur à quartz.

Vibration mécanique sur un **mode propre de résonance** du **matériau.**

Mode de cisaillement d'épaisseur

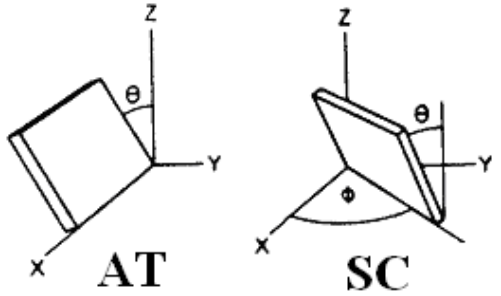
Propriétés remarquables du quartz



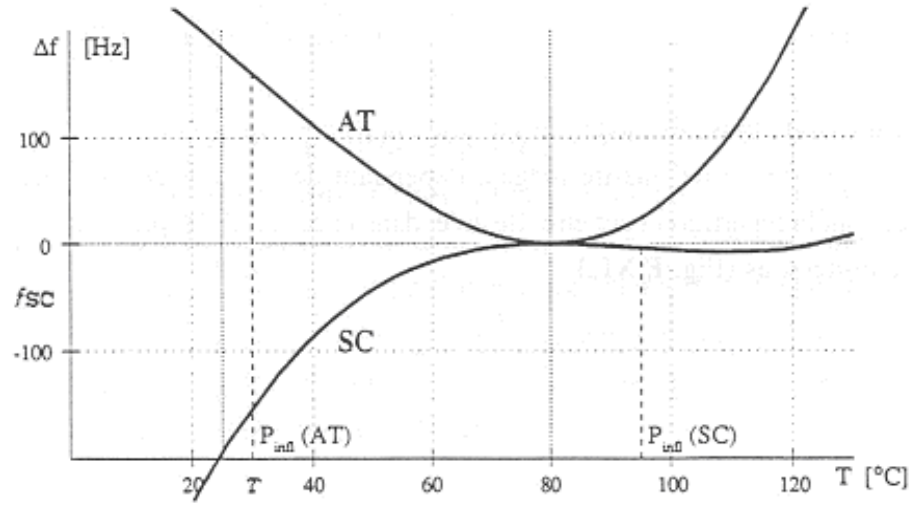
Fréquence très stable.

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.

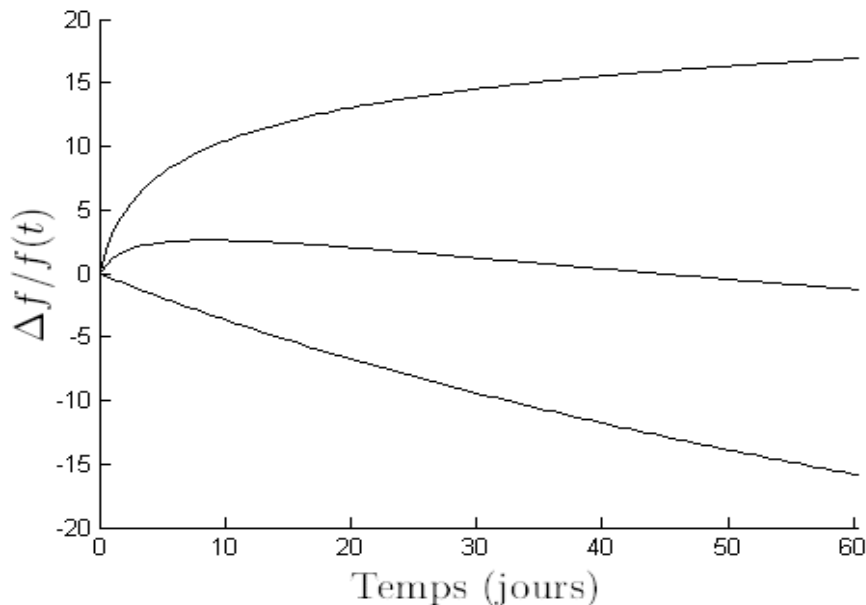
Conclusion générale.

Définition :

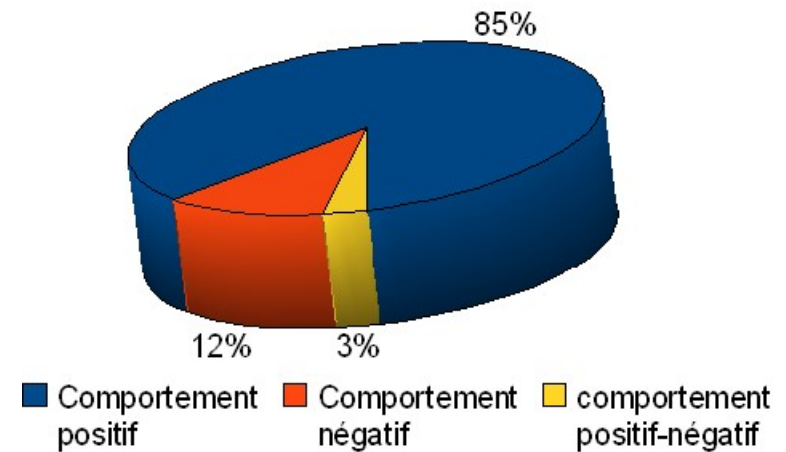
Variation systématique de la fréquence de résonance en fonction du temps due aux changements internes au résonateur.

Vieillessement pour un résonateur de coupe SC : $\approx 10^{-11}$ /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.

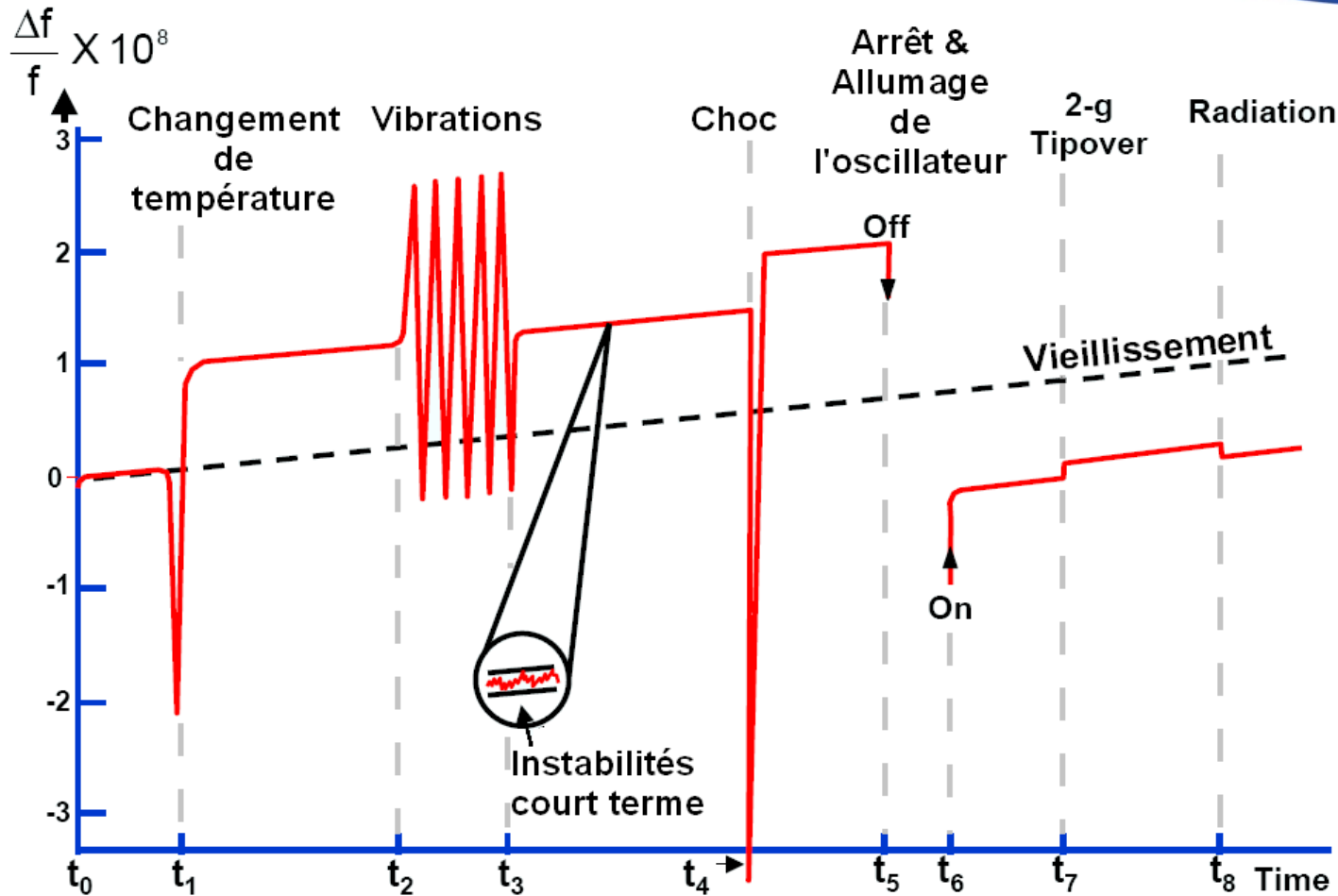
→ la varicap (généralement limitée à qq 10^{-7})

Exemple concret.

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

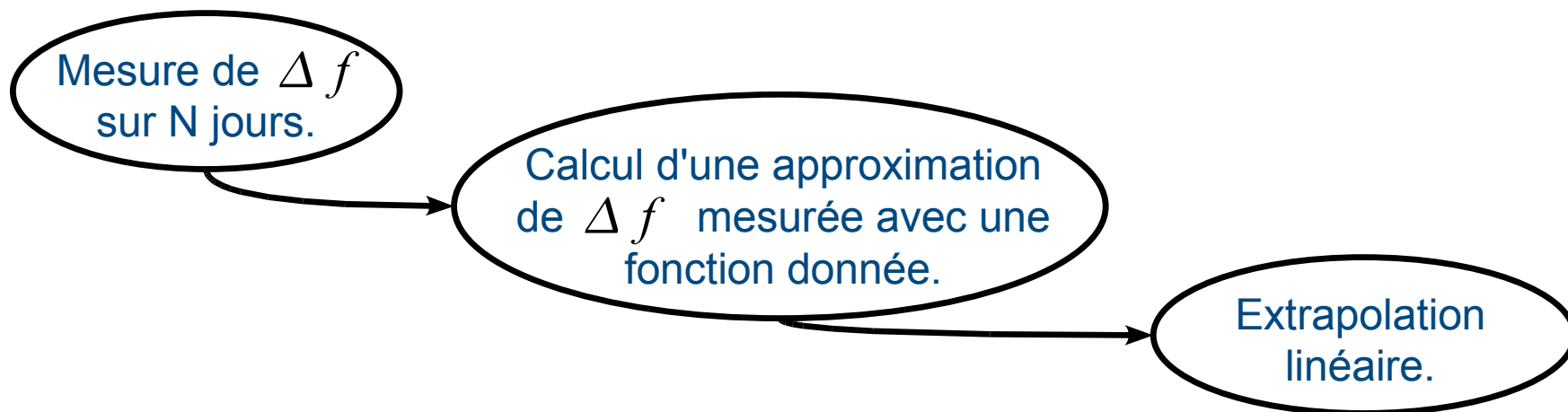
Durée de vie de l'oscillateur ≤ 14 ans

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 :

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

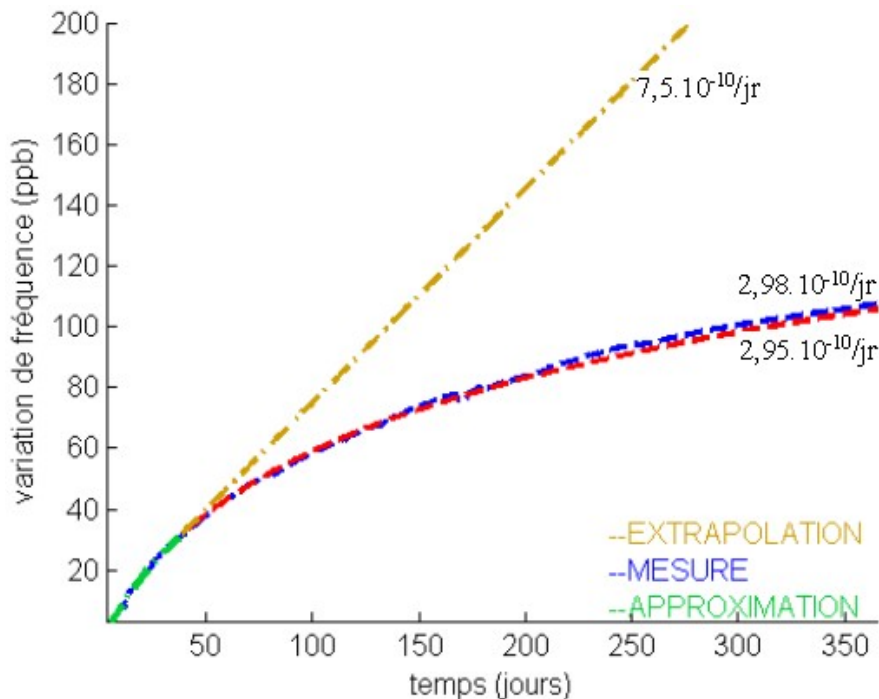
Tangente à la fin de T_a .

Vieillessement pendant T_a .

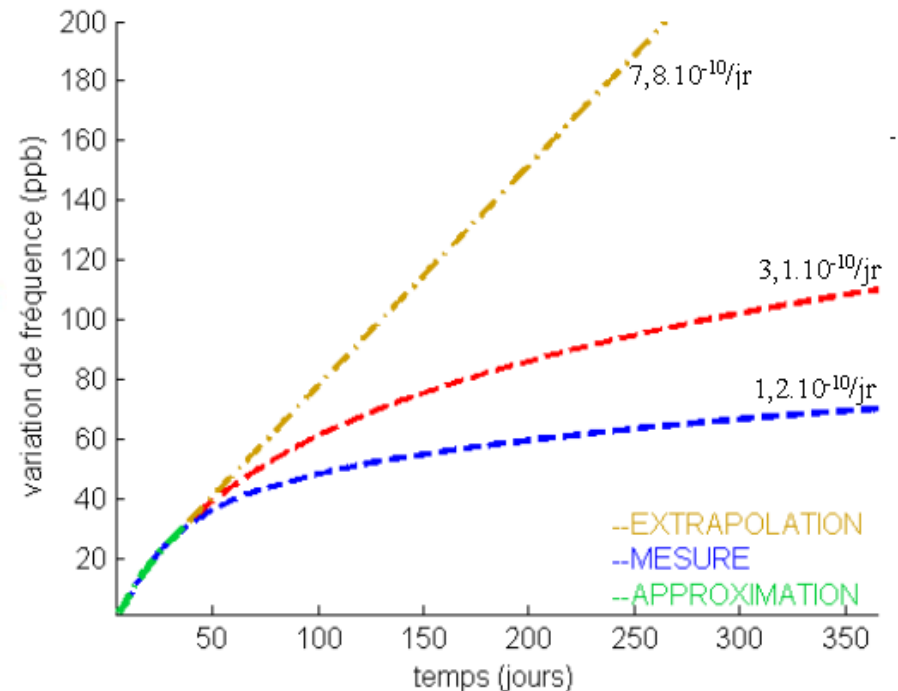
2 étapes du vieillissement :

-  **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^3 fermé sous : 10^{-8} mbar à 25°C

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

$n = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ mole}$ de gaz sont enfermées dans le boîtier.

Exemple : molécule d'eau (18 g.mol^{-1})

Poids du gaz présent dans le boîtier : $2,1 \cdot 10^{-11} \text{ g}$

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

$$\frac{\Delta f}{f_0} = 5 \cdot 10^{-10}$$

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

→ Phénomène provoquant au pire $5 \cdot 10^{-10}$ 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

+

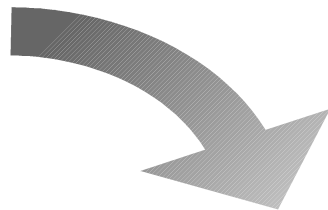
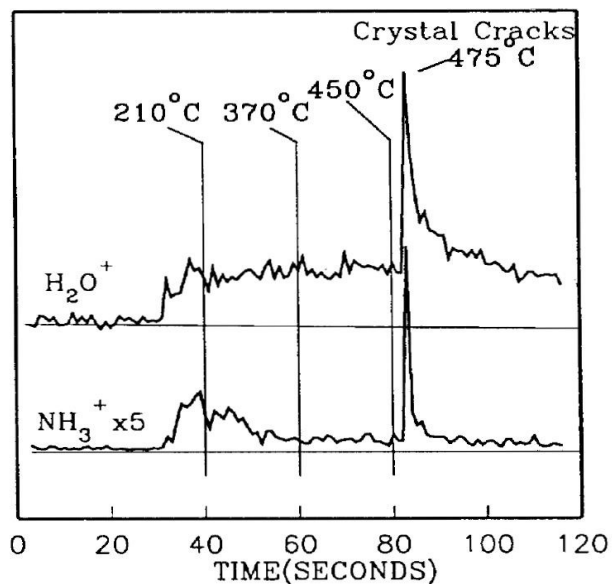
Nature réversible de l'adsorption-désorption

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	8×10^{-7}	8×10^{-13}
1 hr.	0.5	4×10^{-7}	4×10^{-13}
10 hrs.	0.001	8×10^{-10}	8×10^{-15}

Dégazage des molécules d'eau du quartz.

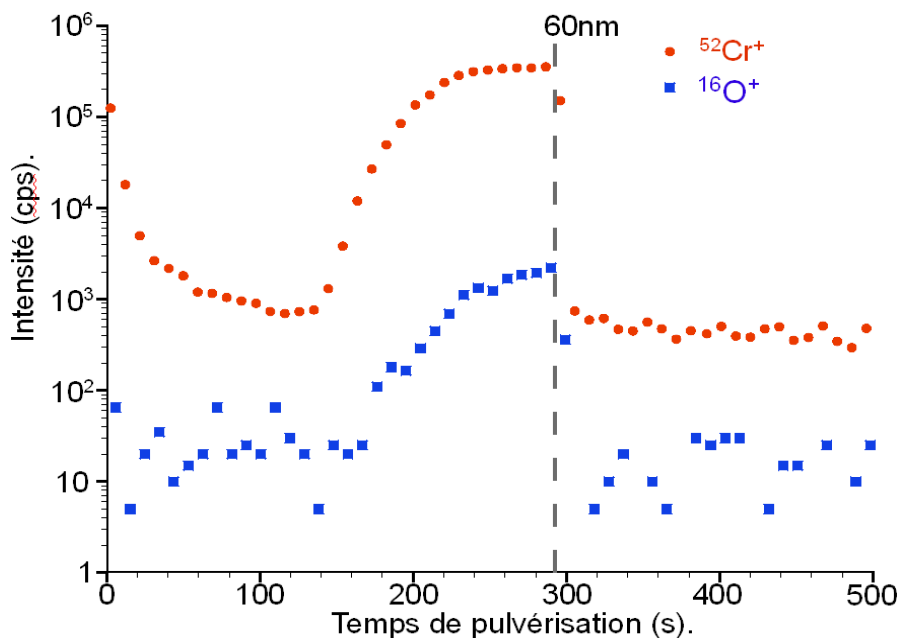
➔ Un dégazage d'une heure à 300°C $\Rightarrow \frac{\Delta f}{f_0} < 5 \cdot 10^{-13} / \text{jour}$

➡ Les effets de diffusion.

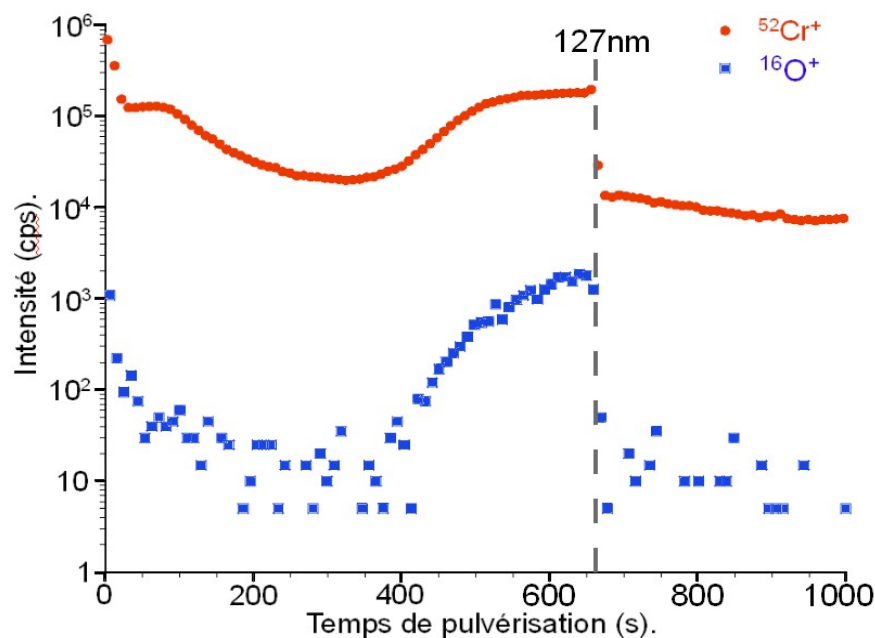
Résonateur = champ électrique faible

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.

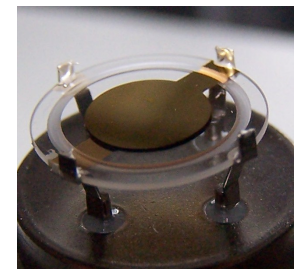
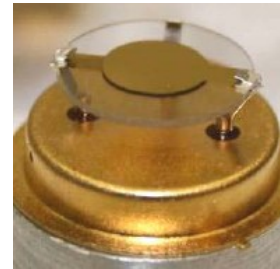
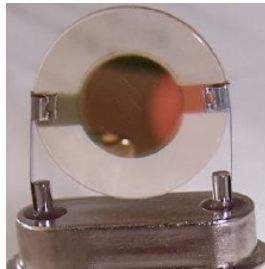
Coupe SC = contraintes mécaniques compensées (électrodes circulaires).

→ Effet des contraintes sur la fréquence de résonance négligeable.

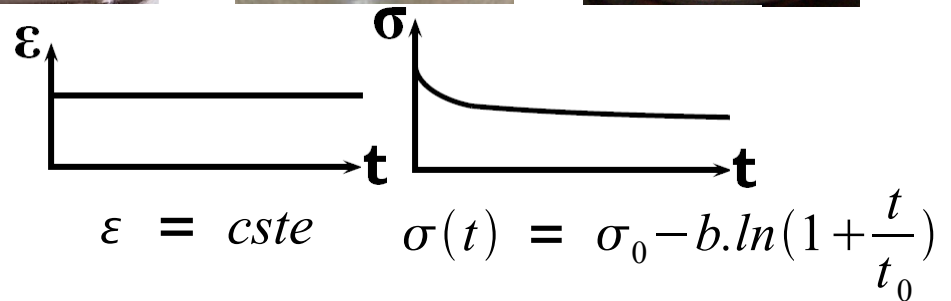
↳ La structure de montage.

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.

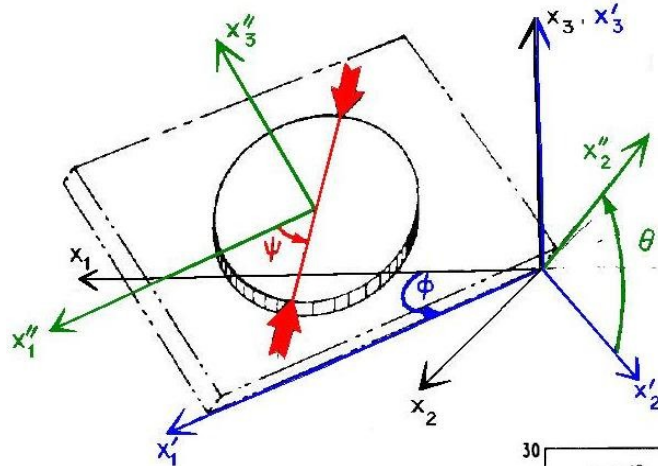
Plan d'expériences.

Conclusion générale.

➡ Effet force-fréquence :

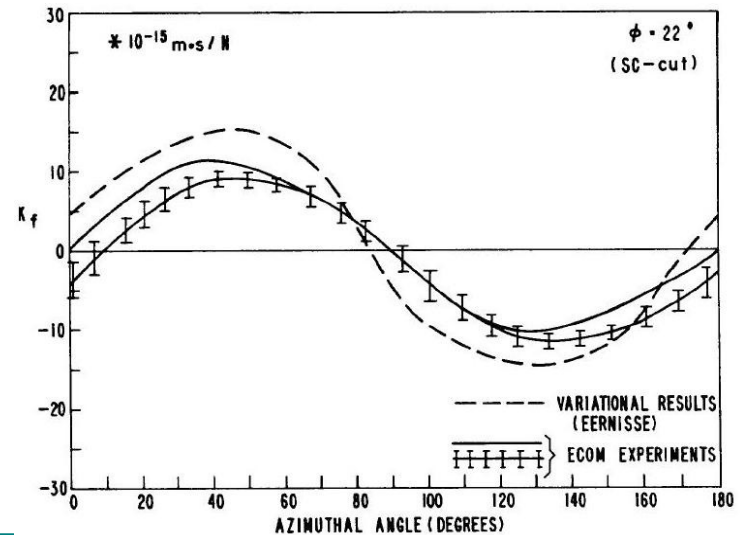
lien entre les forces extérieures radiales et la variation de fréquence.

Mesure de la variation de fréquence en fonction de l'azimut Ψ .

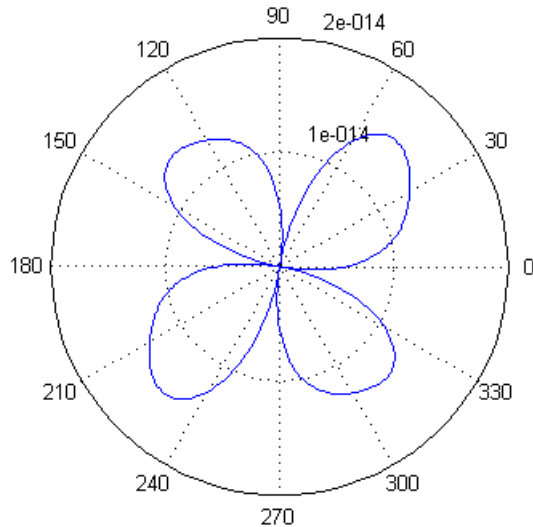


Coefficient force-fréquence :

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



Propriétés du K_f :



Valeurs particulières :

	Valeur de ψ			
$K_{f_{MAX}}$	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 $K_{f_{MAX}}$

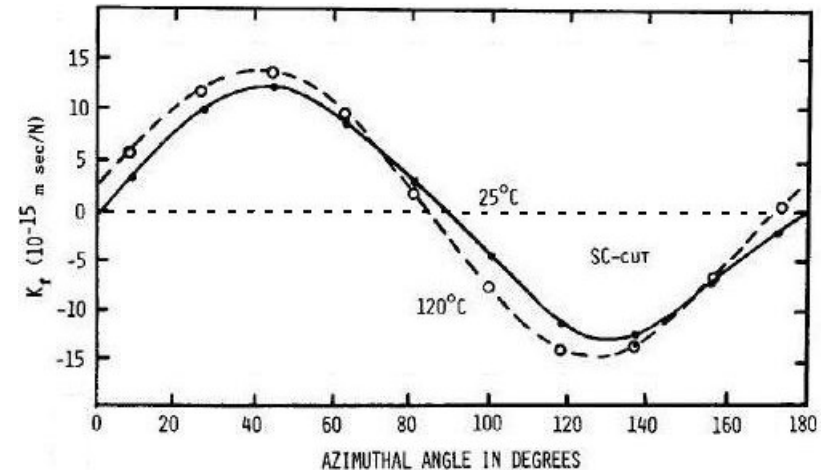


Repérage des faces

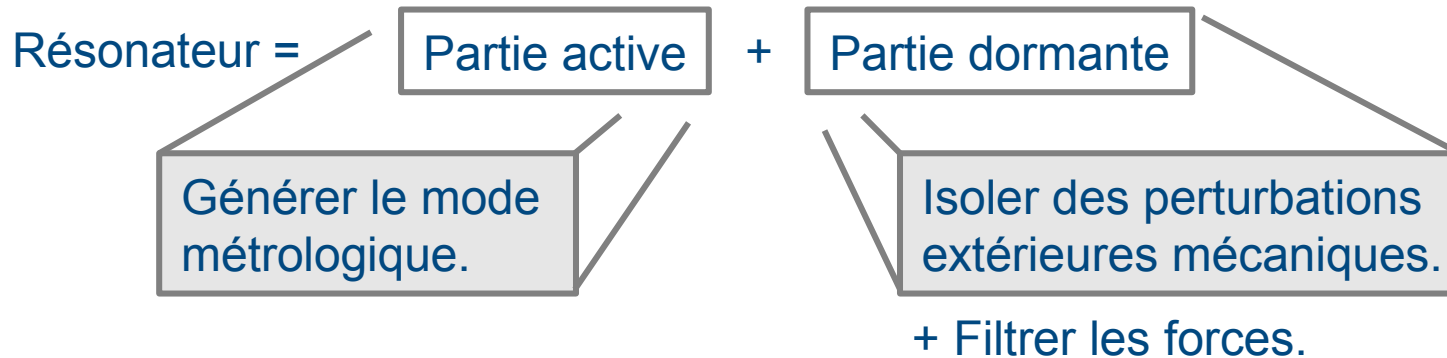
Sensibilité thermique :

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

¹ ψ_0 azimut où $K_f = 0$ à 25°C.

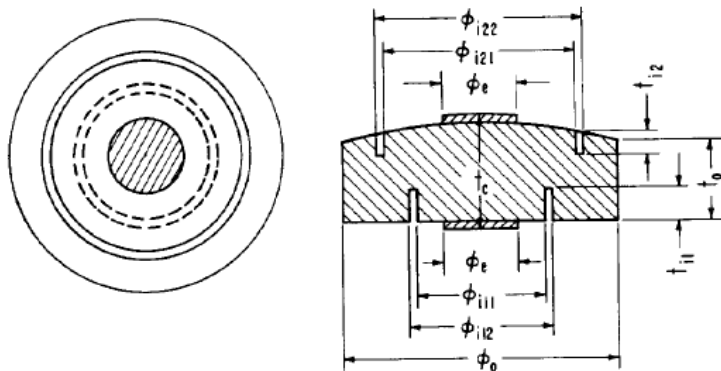


➡ Réduire l'effet force-fréquence : réduire les contraintes dans la partie centrale

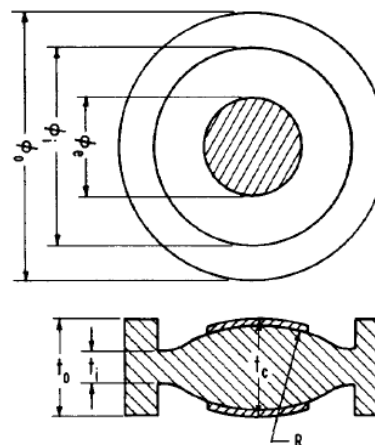


➡ Recherche bibliographique sur l'effet force-fréquence.

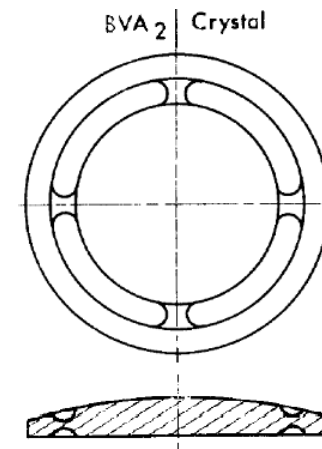
'grooved resonator'



'ring-supported resonator'



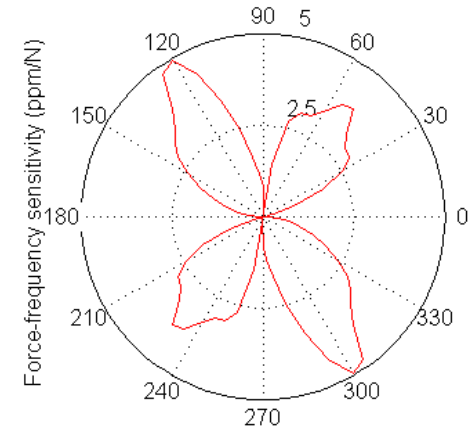
Résonateur BVA



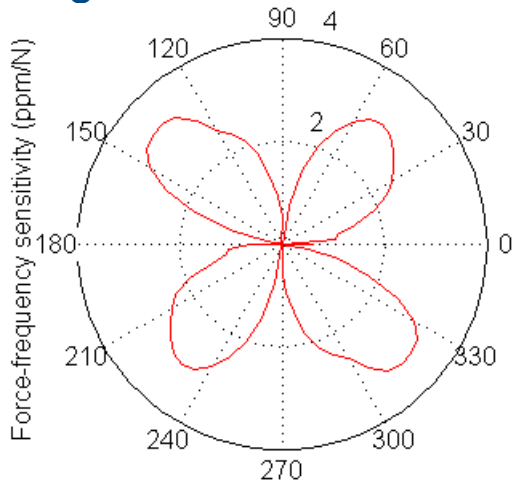
Comprendre les spécificités de chaque type de lame.

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

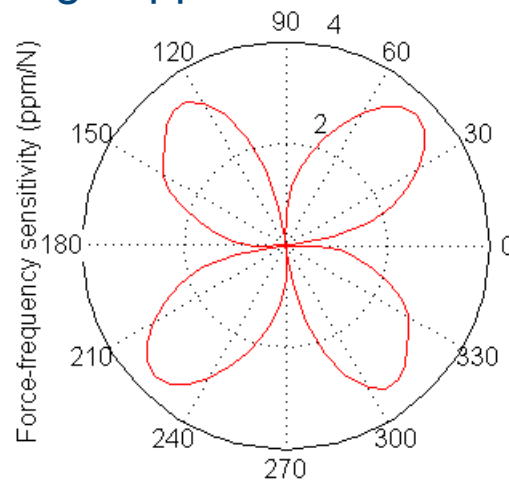
Sensibilité force-fréquence.



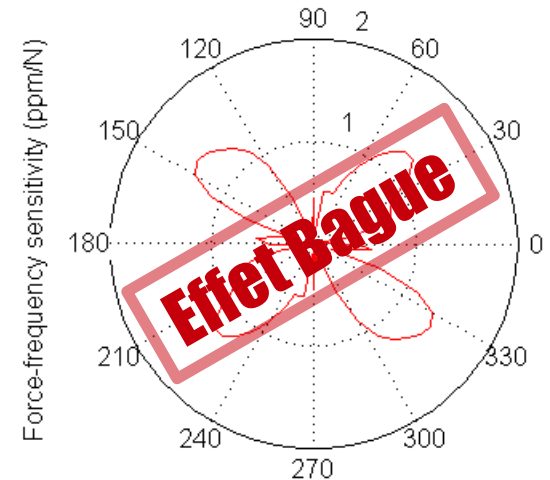
'grooved resonator'



'ring-supported resonator'



Résonateur BVA



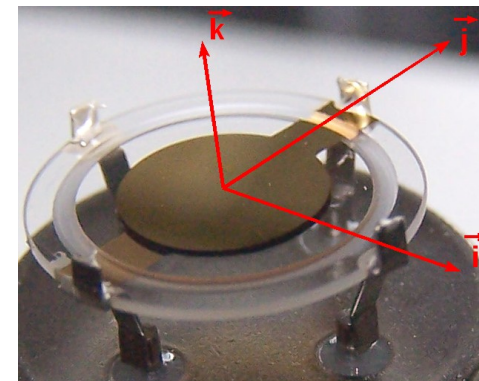
$K_{f_{MAX}}$ 30 % de moins

Forme plus symétrique, plus adaptée à 4 points

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

⇒ Sensibilité accélérométrique.

design	Γ_x	Γ_y	Γ_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 ¹	$9,2 \cdot 10^{-10}$	$5,4 \cdot 10^{-10}$	$8,3 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-9}$
BVA4 ²	$6,5 \cdot 10^{-10}$	$6,4 \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$
BVA2 ³	$9 \cdot 10^{-11}$	$7 \cdot 10^{-11}$	$9 \cdot 10^{-11}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$
BVA2 ³ bi-conv	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-11}$	$4,4 \cdot 10^{-11}$



Vecteur $\vec{\Gamma}$:

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

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

¹La structure de montage est alignée dans la direction des ponts.

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

³BVA₂ a des électrodes non-adhérentes alors que le BVA₄ est métallisé.

⇒ Remarques :

- effet de la rainure : Γ_z considérablement réduit (≈ 80 à 90%)
- $|\Gamma|$ du BVA₂ est 85% plus faible que $|\Gamma|$ du BVA₄.
- BVA₄ : montage à 45° des ponts = effet de symétrisation sur Γ_x et Γ_y .

⇒ Interprétations :

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

La rainure = 160 μ 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 Γ_x et Γ_y par le montage à 45° des ponts sur le BVA₄.

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

- $|\Gamma|$ fortement réduit du BVA₂ par rapport au BVA₄.

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

Sensibilité accélérométrique & vieillissement liés par les contraintes mécaniques.

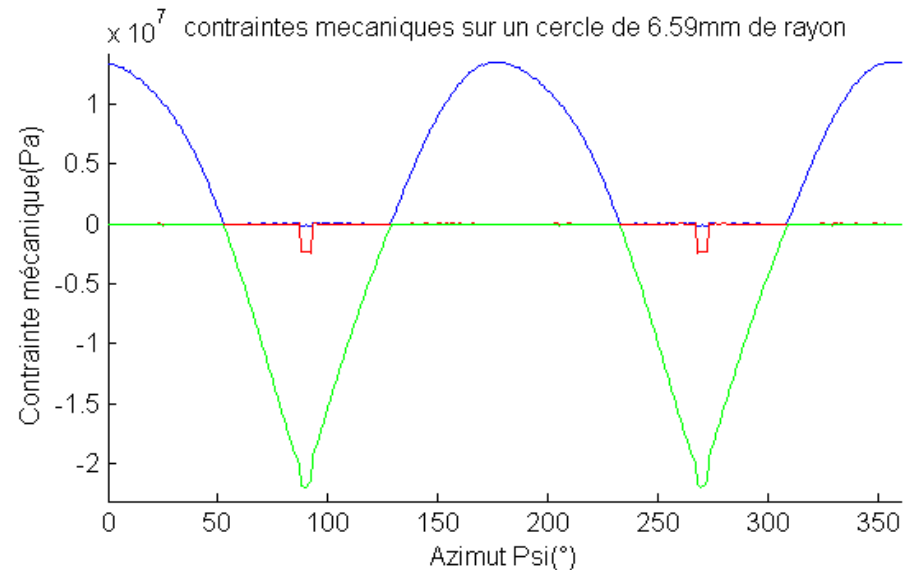
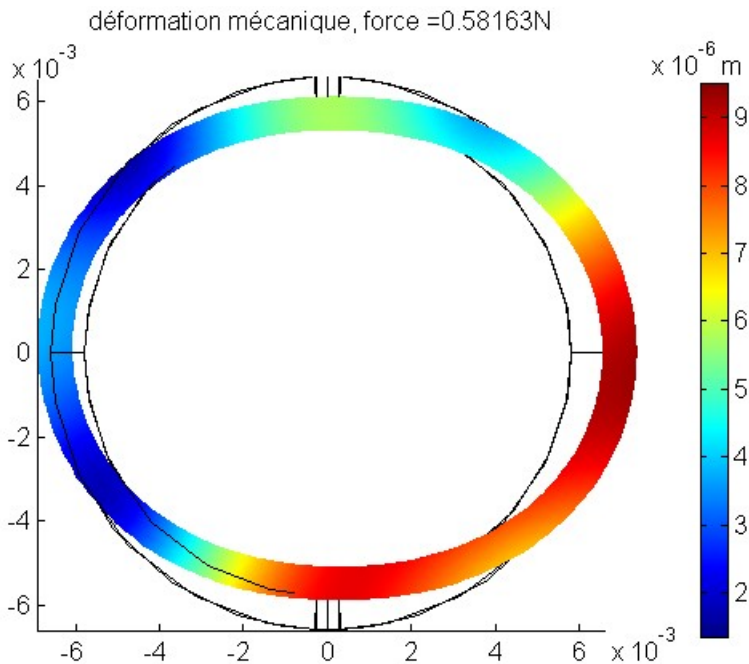
La sensibilité accélérométrique et le vieillissement du BVA₂.

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

➡ Étude des contraintes mécaniques σ_x , σ_y et σ_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.



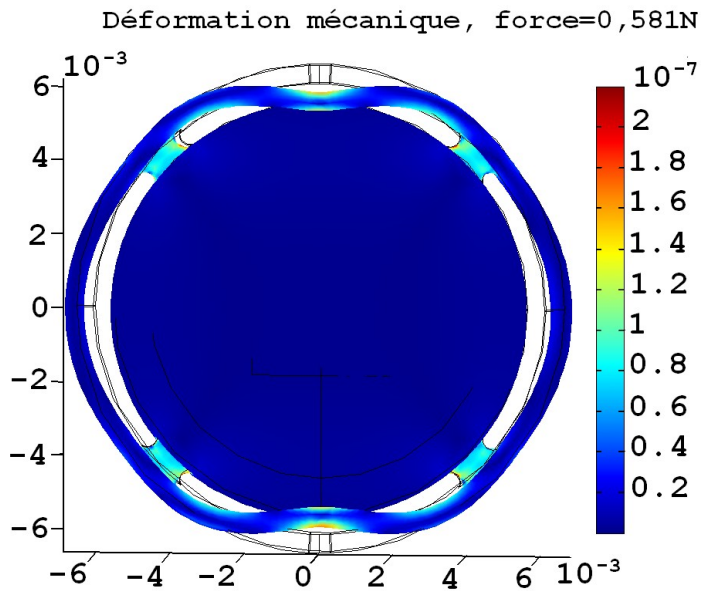
(σ_x en bleu, σ_y en rouge et σ_z en vert.)

La bague a tendance à devenir ovale.



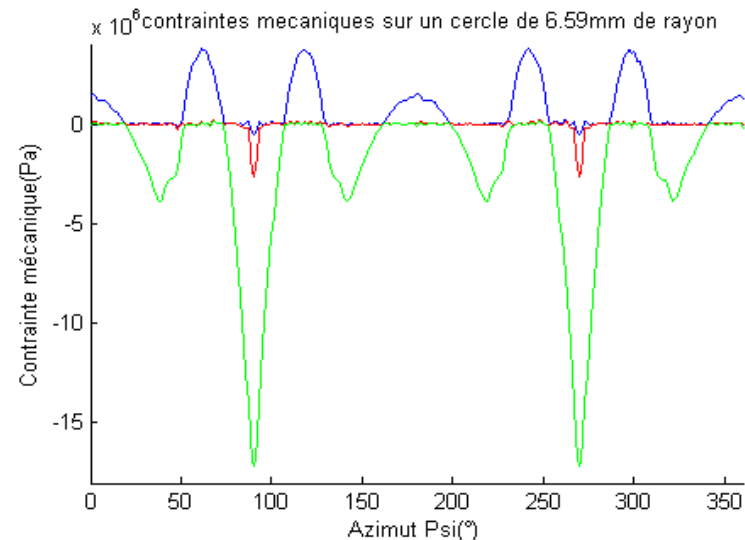
Continuité entre σ_x et σ_z
(pas de concentration).

Le résonateur BVA soumis à 2 forces opposées.



- Déformation de la bague par partie.
- Continuité entre σ_x et σ_z formée par des ventres.

⇒ Confirme l'interprétation des mesures.



(σ_x en bleu, σ_y en rouge et σ_z en vert.)

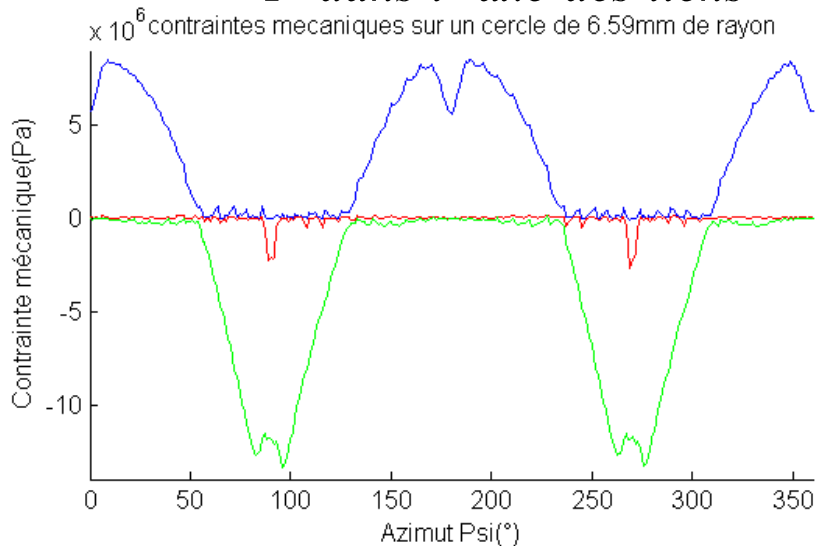
↳ Observations et interprétations.

Nouveau résinateur.

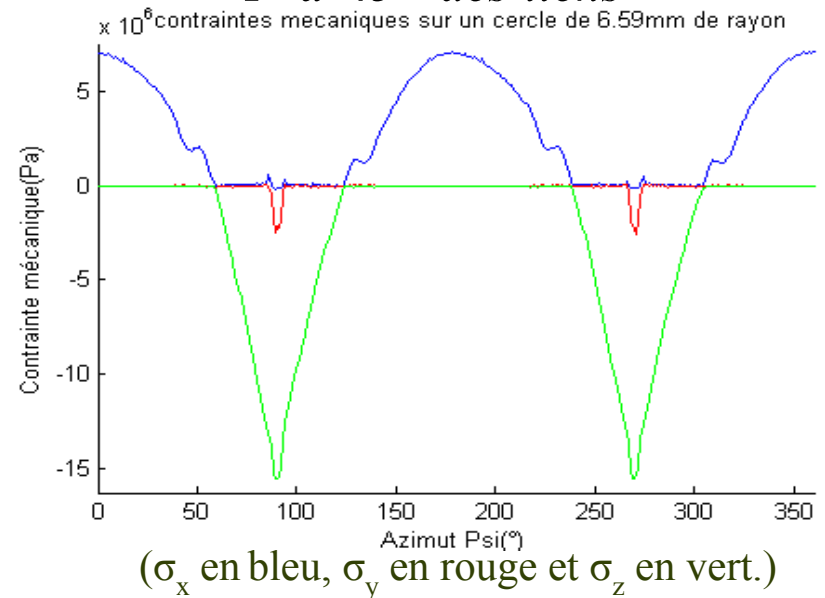
Bague extérieure + Partie active

GEOMETRIE CONFIDENTIELLE.

\vec{F} dans l'axe des liens

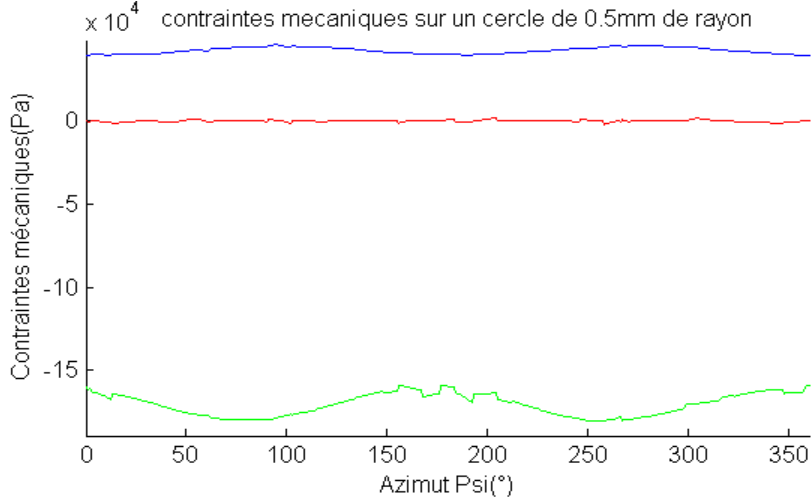


\vec{F} à 45° des liens

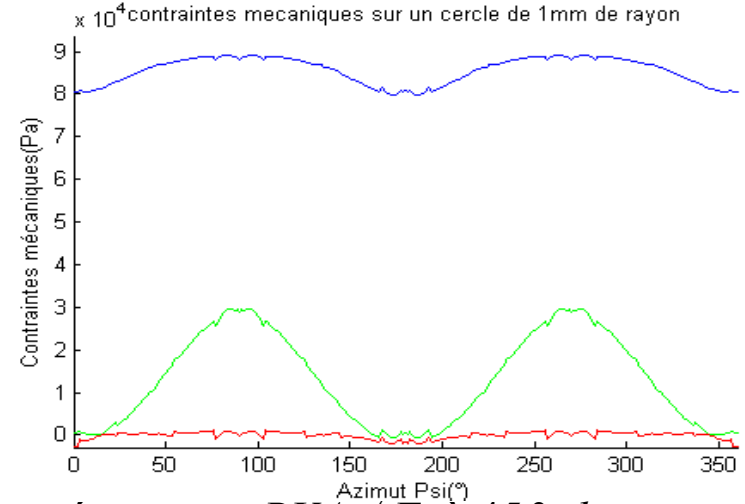


→ La bague extérieure se comporte comme la bague libre.

↳ Contraintes mécaniques dans la partie active.



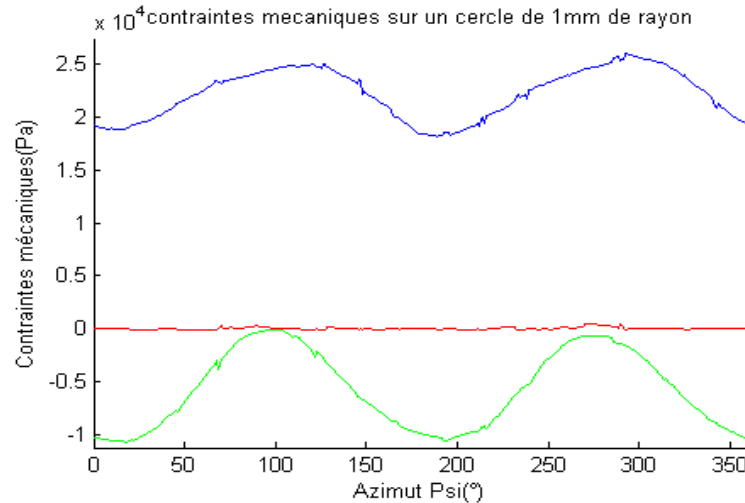
résonateur standard.



résonateur BVA_4 (\vec{F} à 45° des ponts)

*nouveau résonateur
(\vec{F} à 45° des liens)*

-37 % sur σ_x
-96 % sur σ_z



(σ_x en bleu,
 σ_y en rouge
 σ_z en vert.)

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

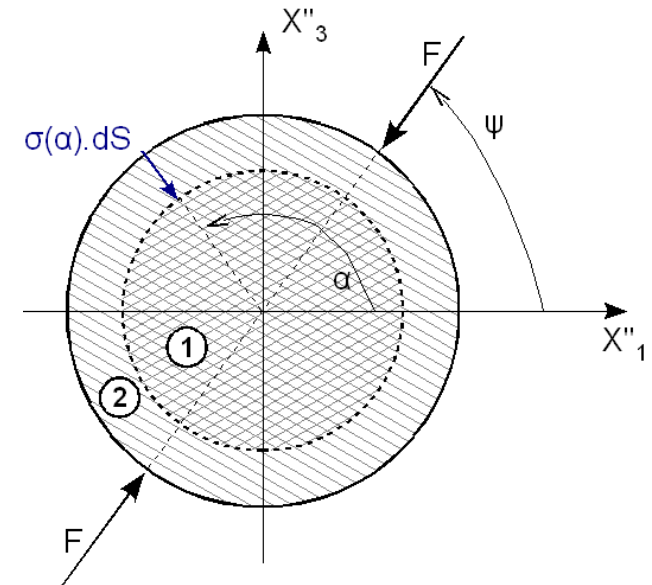
Calcul de la sensibilité force-fréquence : modèle mixte.

① Partie active : modèle analytique K_f .

② Partie dormante : FEM.

→ Calcul de σ_x , σ_y et σ_z .

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



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

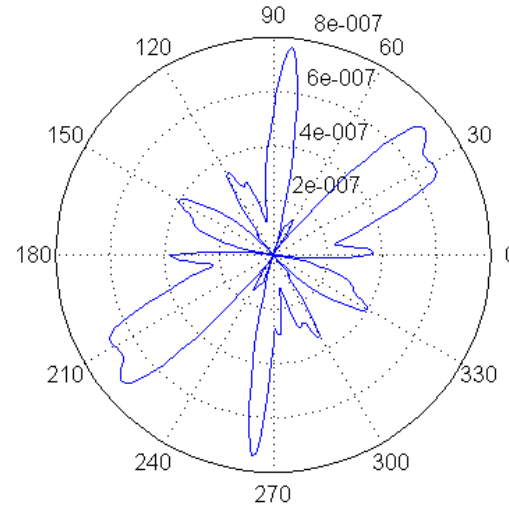
↳ Résultats de la simulation :

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

Résonateur standard :

$$\frac{\Delta f}{f_0 MAX} = 5 \cdot 10^{-6} / N$$

→ **-84%**



↳ Fabrication des prototypes :

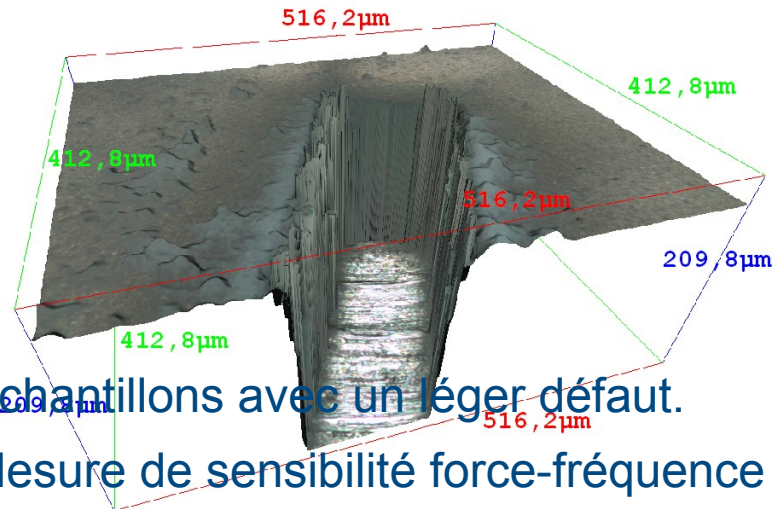
Deep RIE.

170µm, progrès rapide.

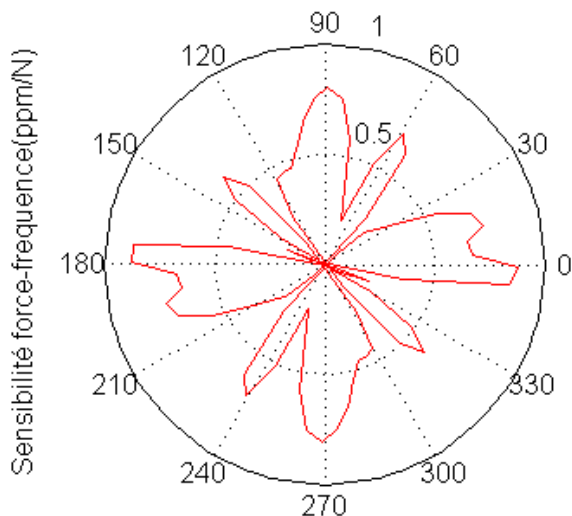
Laser femto-second :

Usinage ultrasonore. → Échantillons avec un léger défaut.

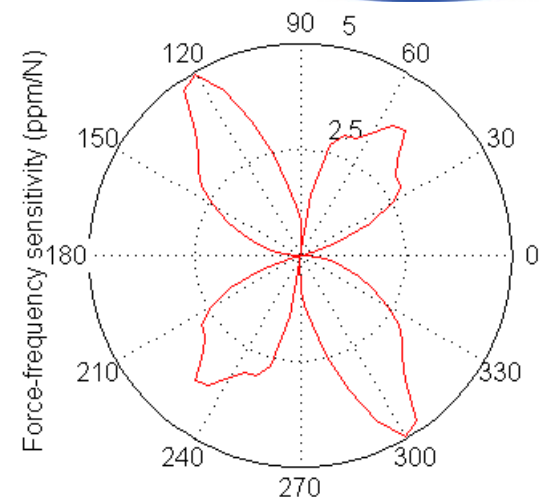
→ Mesure de sensibilité force-fréquence possible.



↳ Mesure de la sensibilité force-fréquence.



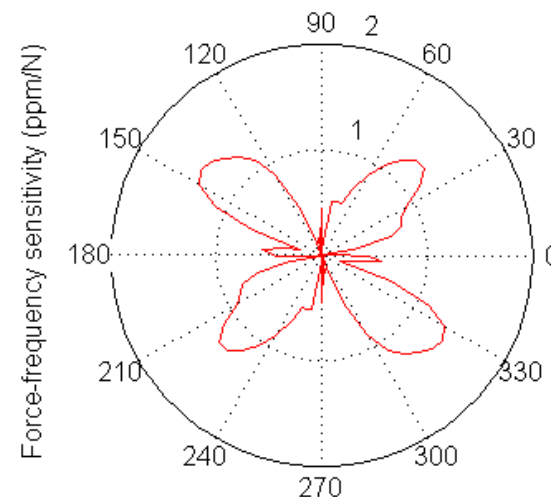
$$\frac{\Delta f}{f_0 \text{ MAX}} = 8.10^{-7} / N$$



Résonateur standard

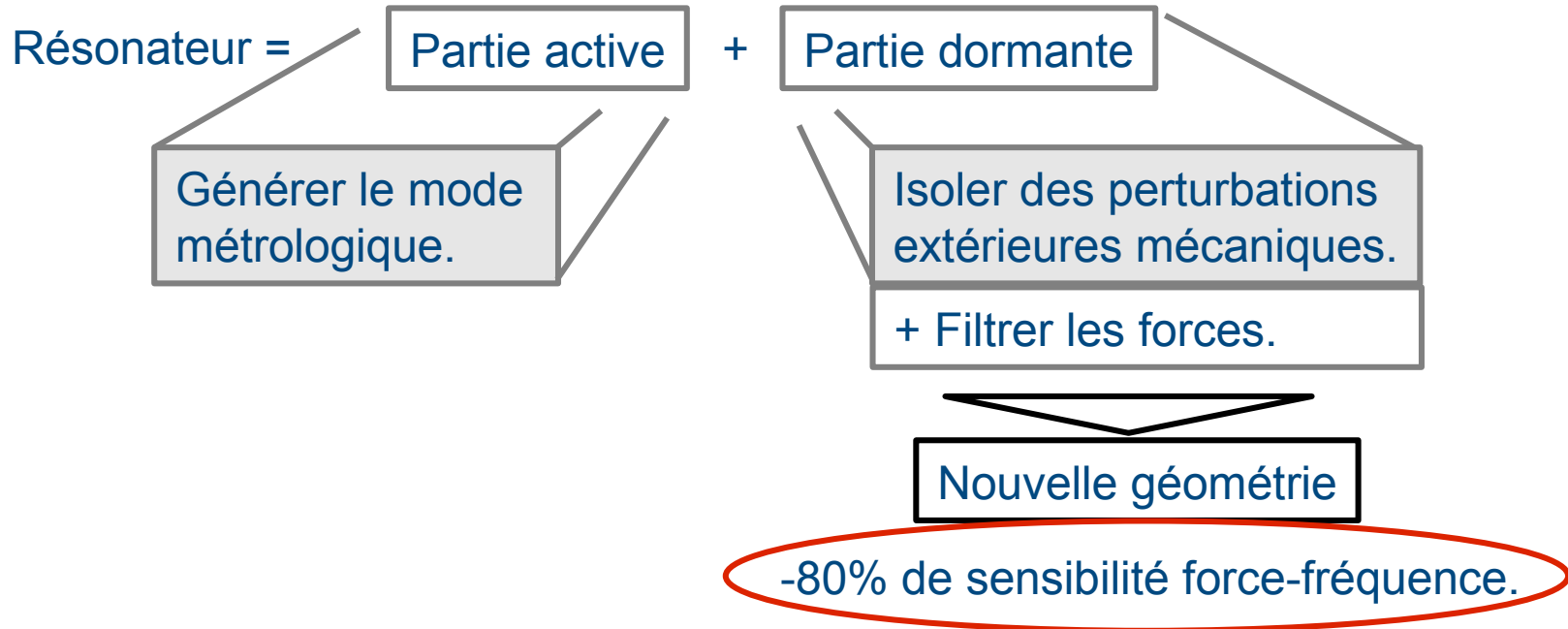
-80% par rapport au résonateur standard

-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.

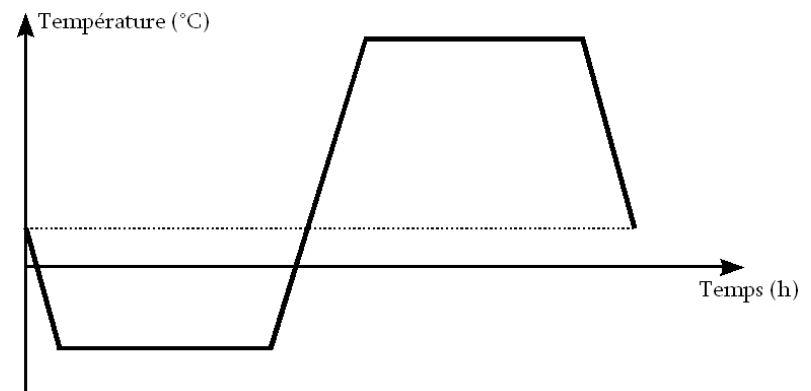
Conclusion générale.

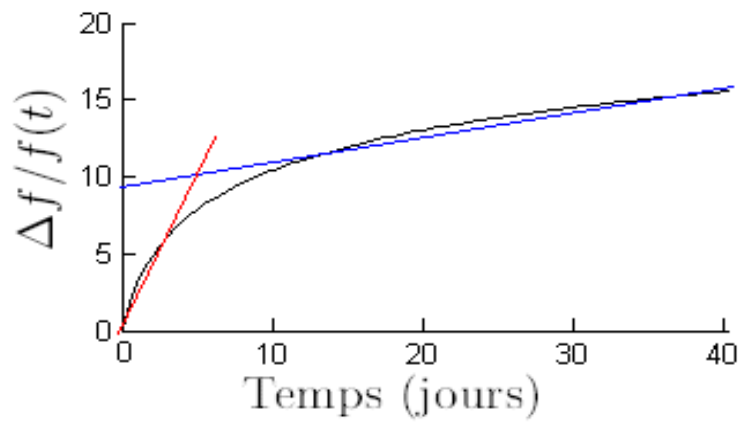
➔ Le pré-vieillesissement :



- 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).

 $Y_i = f(X_{ij})$

Système 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

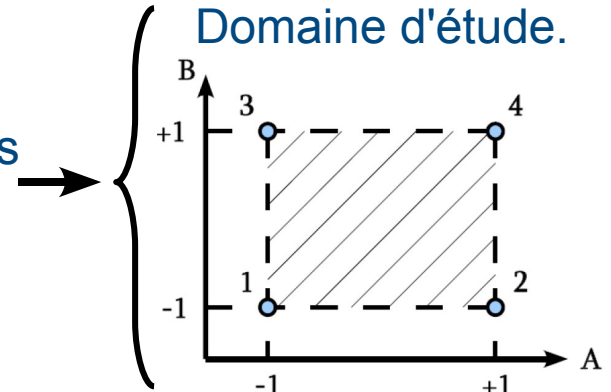
Ne faire varier qu'un facteur à la fois.  **Plan factoriel complet.**

⇒ Plan factoriel complet: plan 2^k.

Ex : 2 facteurs à 2 niveaux. (plan 2² = 4 essais)

N°essai	A	B	A.B	Réponse
1	-1	-1	+1	y ₁
2	+1	-1	-1	y ₂
3	-1	+1	-1	y ₃
4	+1	+1	+1	y ₄

• 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 2⁵ = 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.

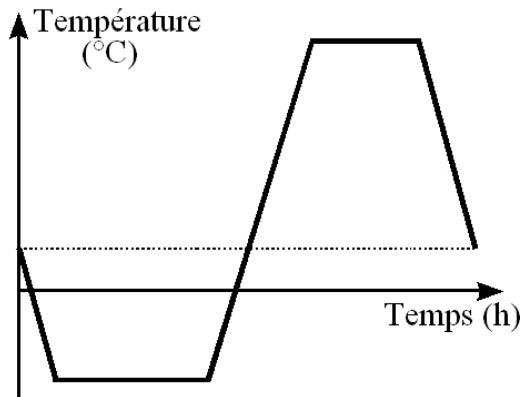
Max = 180°C/h, limite de l'étuve
Min = 50°C/h, < 3.Max.

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)	$R_{motionelle}$ (Ω)	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.

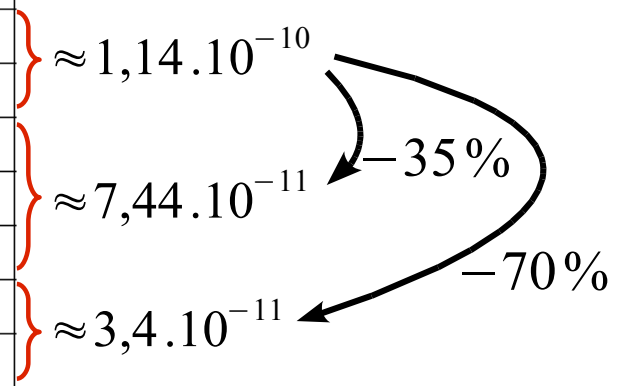
→ Vérifier que a_1 ou a_2 soit faible.

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^{er} groupe : évidence du rôle des contraintes mécaniques.

Vibrations mécaniques → fatigue des clips

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

2^{eme} 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^{eme} 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.

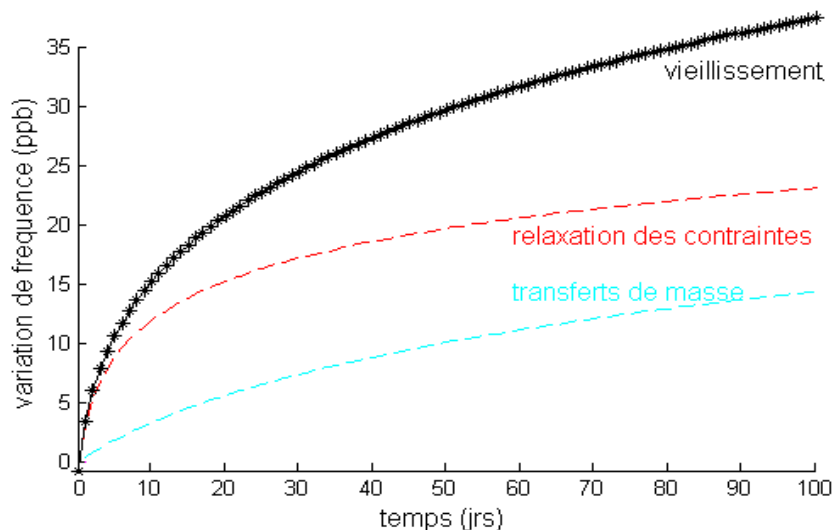
Le vieillissement nominal est le reflet de la qualité de fabrication.

⇒ 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 :
→ Vieillissement = 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.

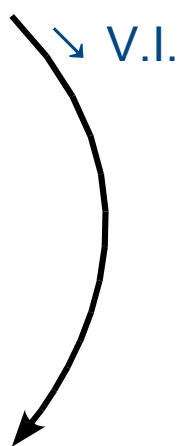
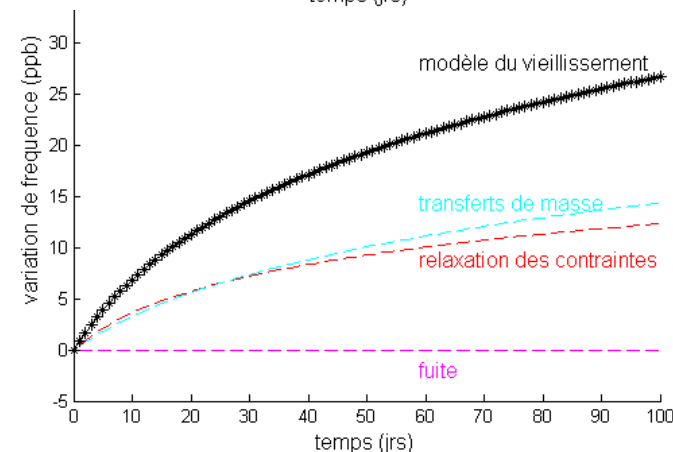
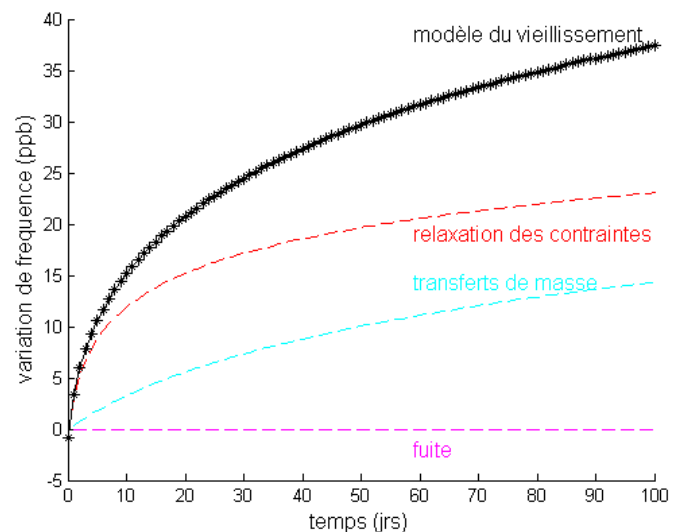
Vieillessement nominal

→ Qualité de fabrication & du montage.

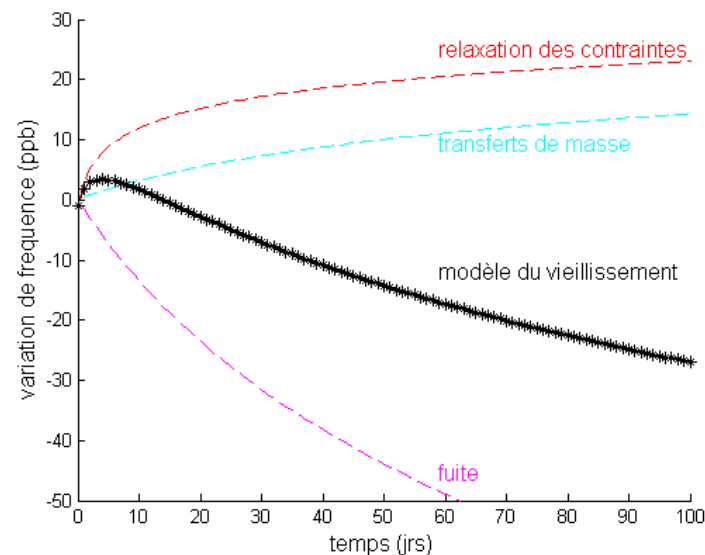
Amélioration du vieillissement nominal :

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.