

Electronique 2^{ème} année

-

Cours sur les oscillateurs

➤ Généralités sur les oscillateurs :

- Qu'est-ce qu'un oscillateur ?
- Structure générale - Conditions d'oscillation
- L'oscillateur pédagogique

➤ Caractéristiques principales d'un oscillateur

- Le résonateur
- Limitations des performances

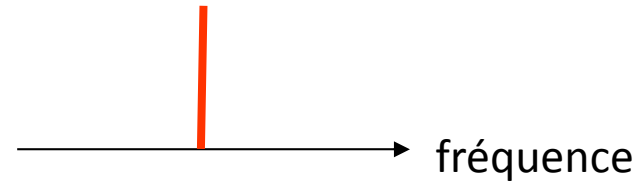
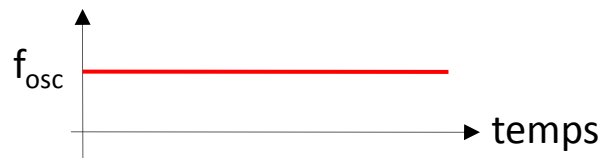
➤ L'oscillateur à quartz

Laurent BECHOU, Gérard COUTURIER
Professeurs - IUT Bordeaux – Département GEii
Email : laurent.bechou@ims-bordeaux.fr

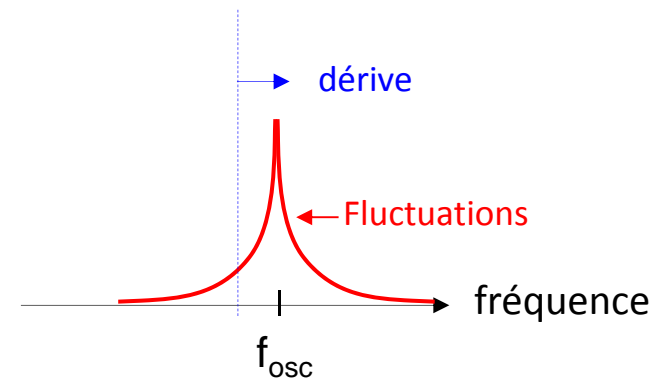
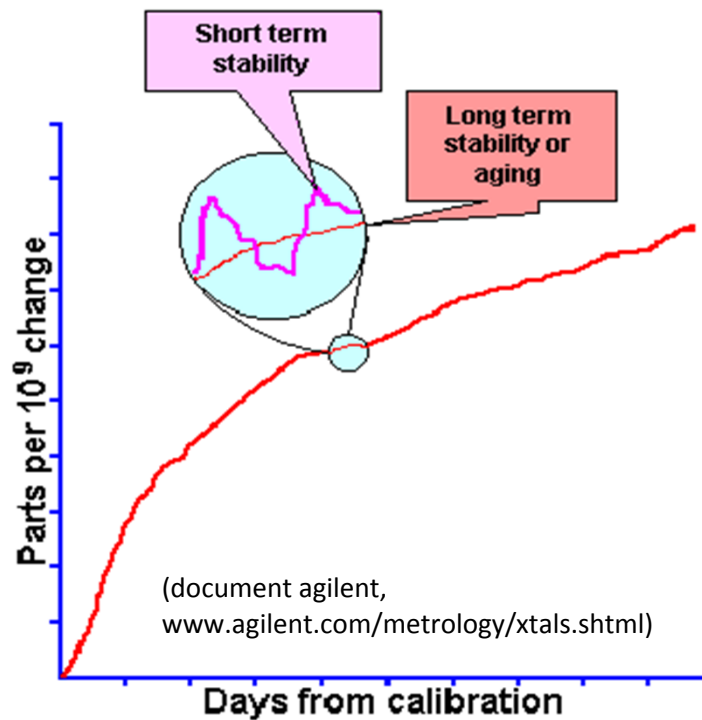


1- Généralités sur les oscillateurs : Qu'est-ce qu'un oscillateur ?

- Stabilité en temps et en fréquence

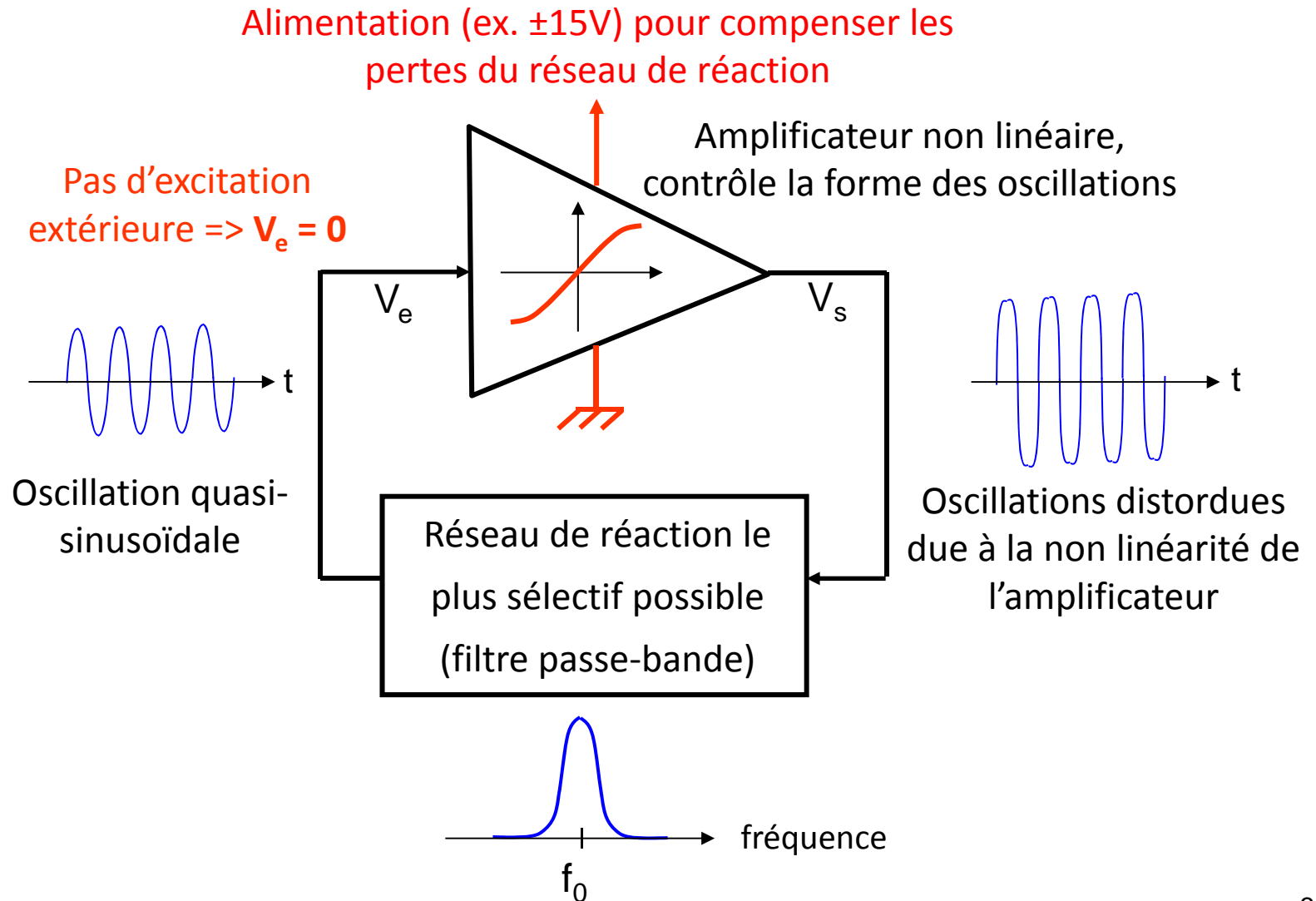


- Dérive en fréquence la plus faible possible (insensible à la température, au vieillissement, ...)



1- Généralités sur les oscillateurs : Qu'est-ce qu'un oscillateur ?

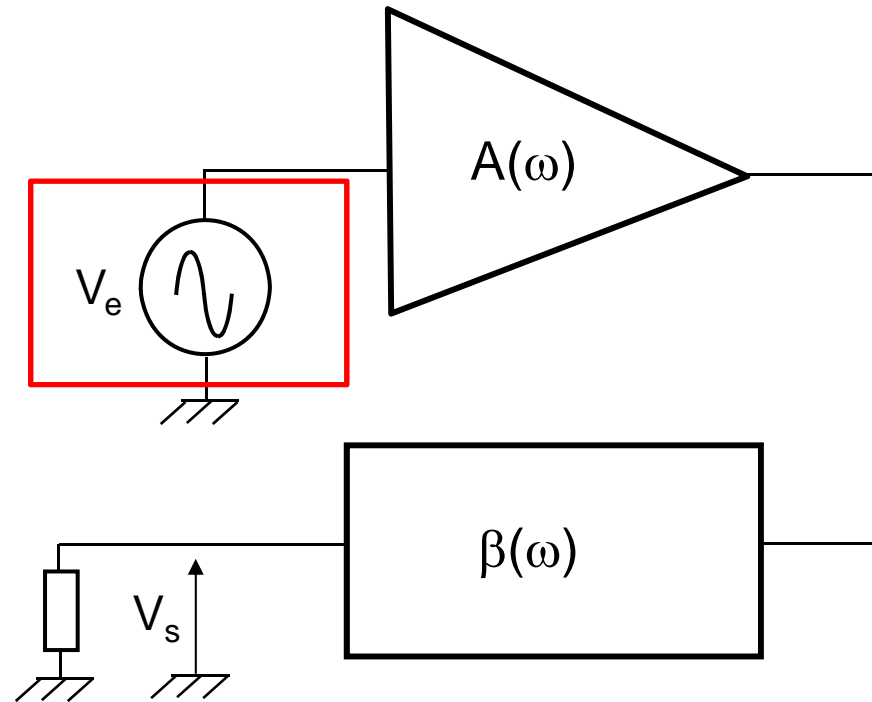
- Système bouclé non linéaire avec amplificateur (gain) et résonateur (réseau de réaction sélectif)



1- Généralités sur les oscillateurs : Structure générale – Conditions d'oscillation

Conditions
d'oscillation =>
Etude en boucle
ouverte => $V_e \neq 0$

Impédance d'entrée
de l'amplificateur
 $A(\omega)$



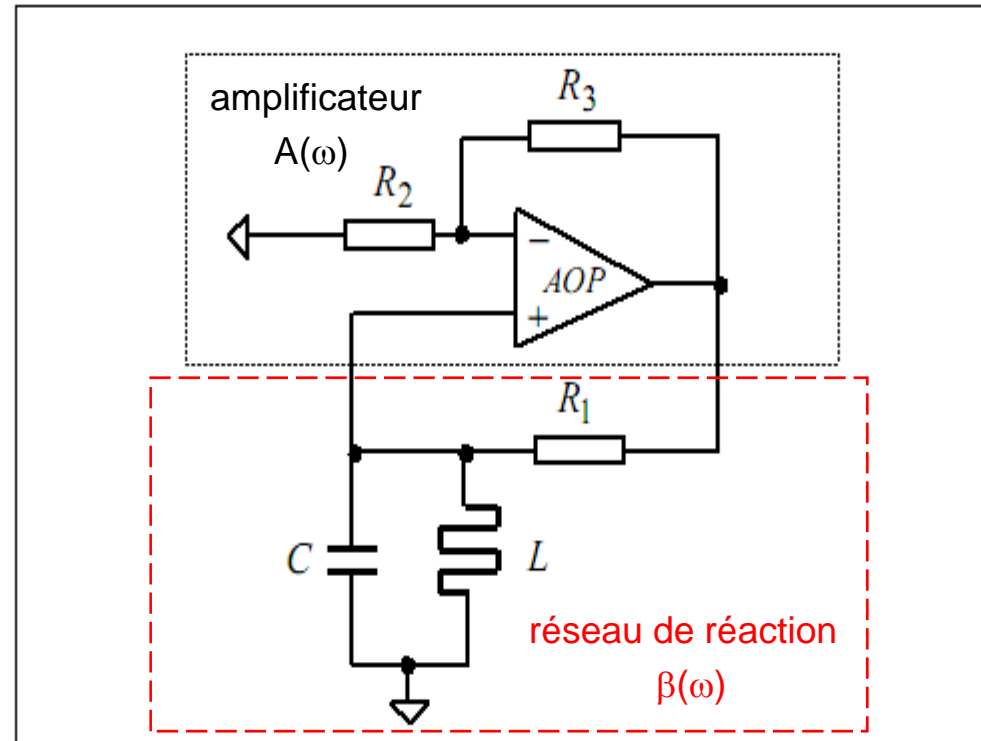
- Condition d'oscillation (**critère de Barkhausen**) : $A(\omega)\beta(\omega) = 1$

avec $A(\omega)\beta(\omega)$: gain en boucle ouverte aux petits signaux

$$\left\{ \begin{array}{l} |A(\omega)\beta(\omega)| = 1 \\ \varphi(A(\omega)\beta(\omega)) = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \begin{array}{l} \bullet \text{ Fréquence des oscillations} \\ \bullet \text{ Valeur minimale du gain pour obtenir les oscillations} \end{array}$$

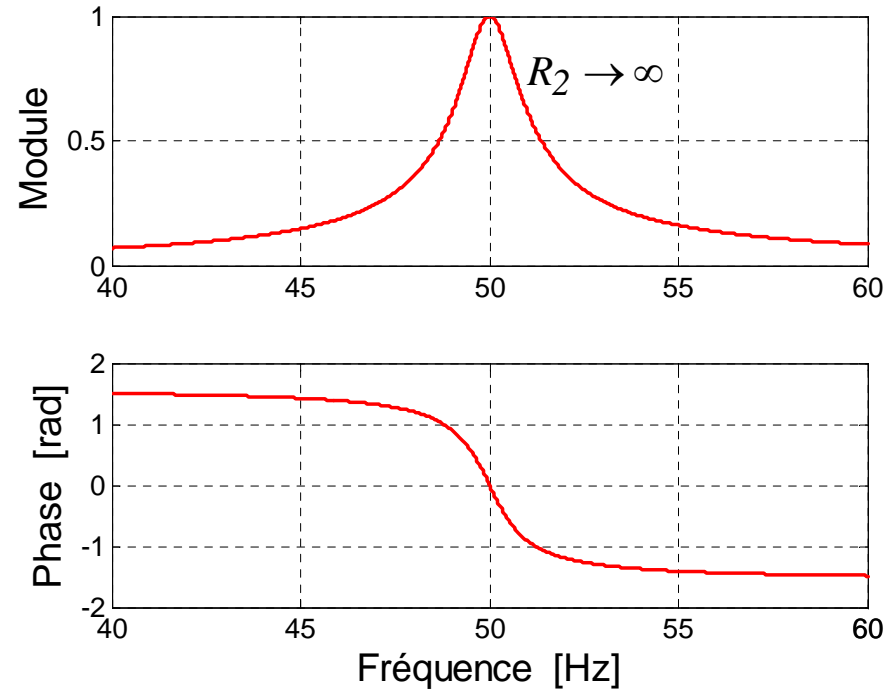
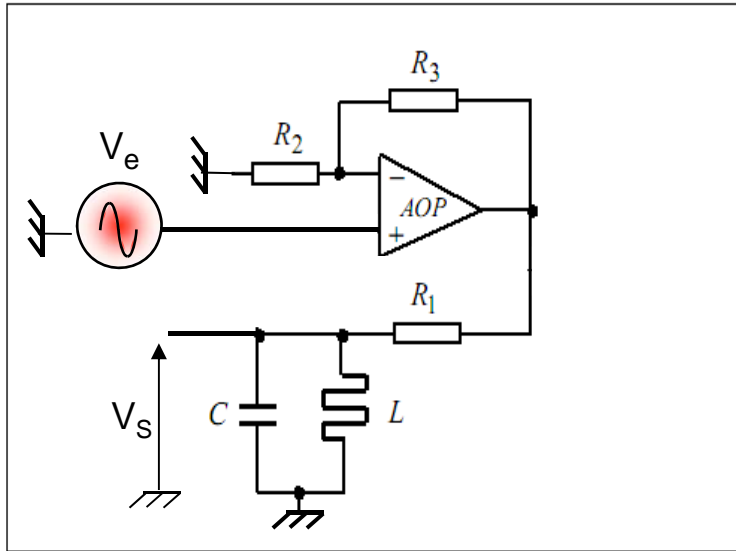
1- Généralités sur les oscillateurs : L'oscillateur pédagogique

- Exemple d'oscillateur pédagogique



- Amplificateur : 1 AOP et 2 résistances. Les non-linéarités : limitation du courant de sortie de l'AOP et tensions d'alimentation
- Réseau de réaction : circuit R - L - C

1- Généralités sur les oscillateurs : L'oscillateur pédagogique



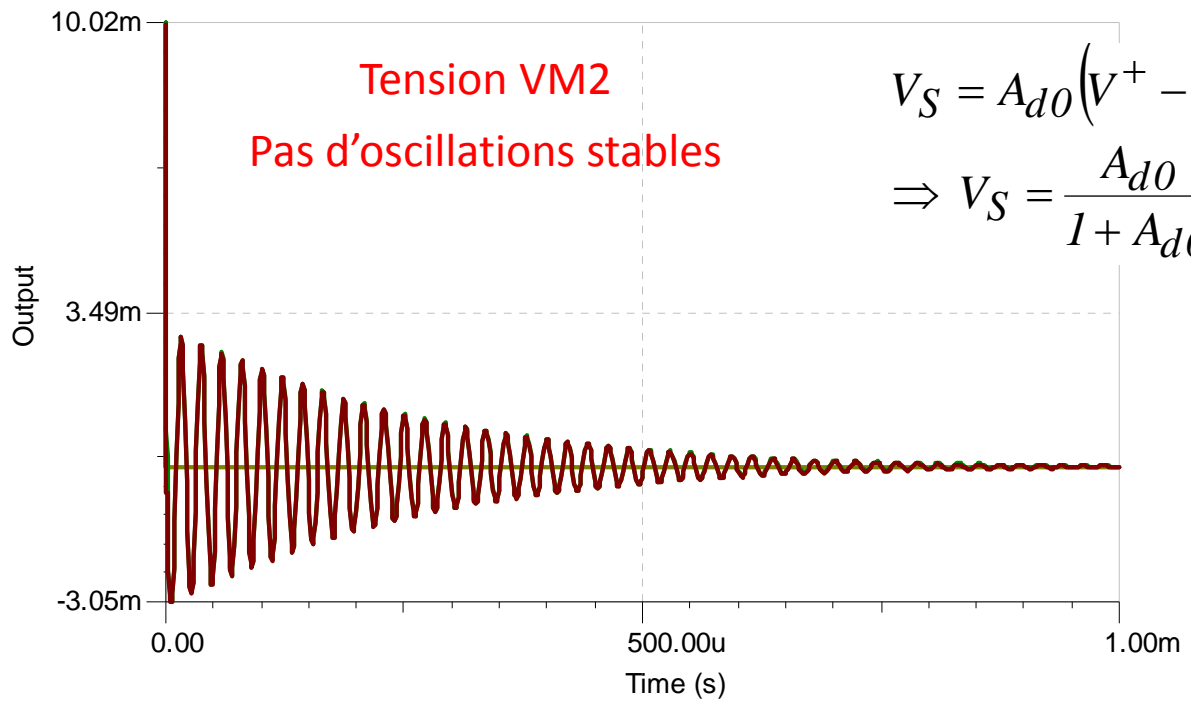
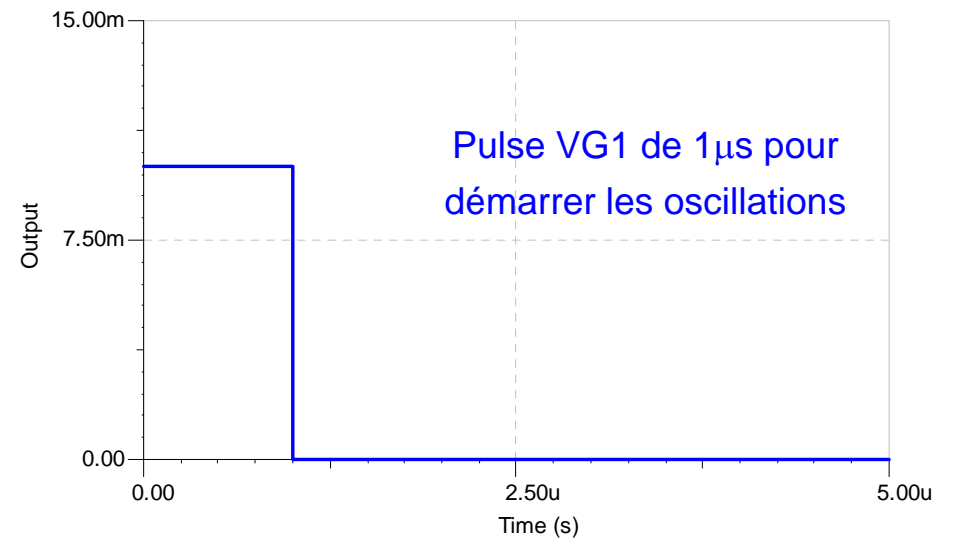
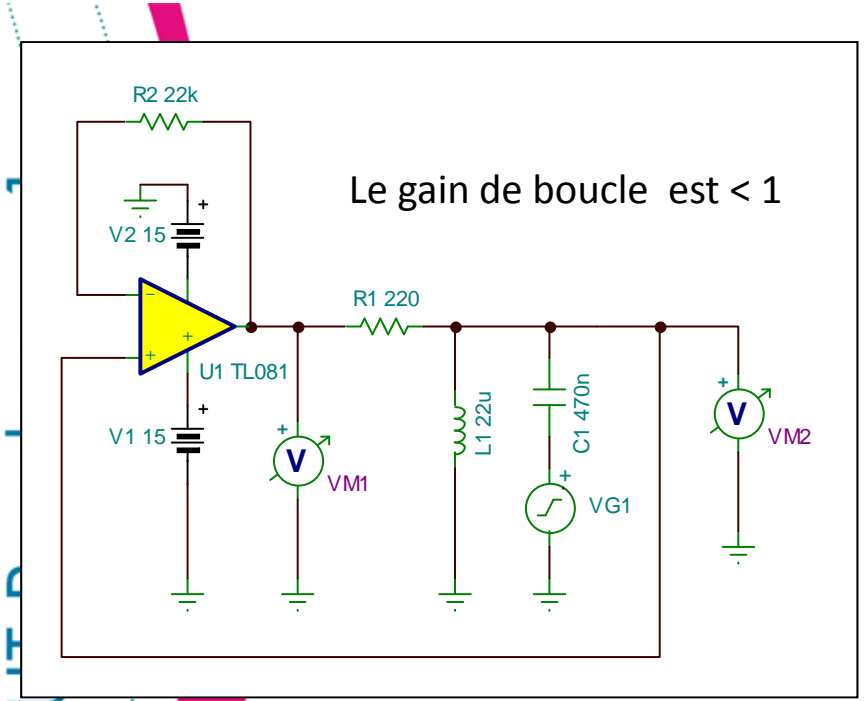
Hypothèse : AOP idéal, L et C sans pertes

$$A(\omega)\beta(\omega) = \frac{V_S}{V_e} = \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) \frac{j\omega \frac{\omega_0}{Q}}{(-\omega^2 + \omega_0^2) + j\omega \frac{\omega_0}{Q}} \quad \text{avec } Q = R_1 C \omega_0 \text{ et } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

- **La phase est nulle pour $\omega = \omega_0$** , d'où : $\omega_{osc} = \omega_0$.

- **Pour $\omega = \omega_0$, le module $|A(\omega_0)\beta(\omega_0)| = 1$** avec $R_2 \rightarrow \infty$.

Simulation sous le logiciel TINA

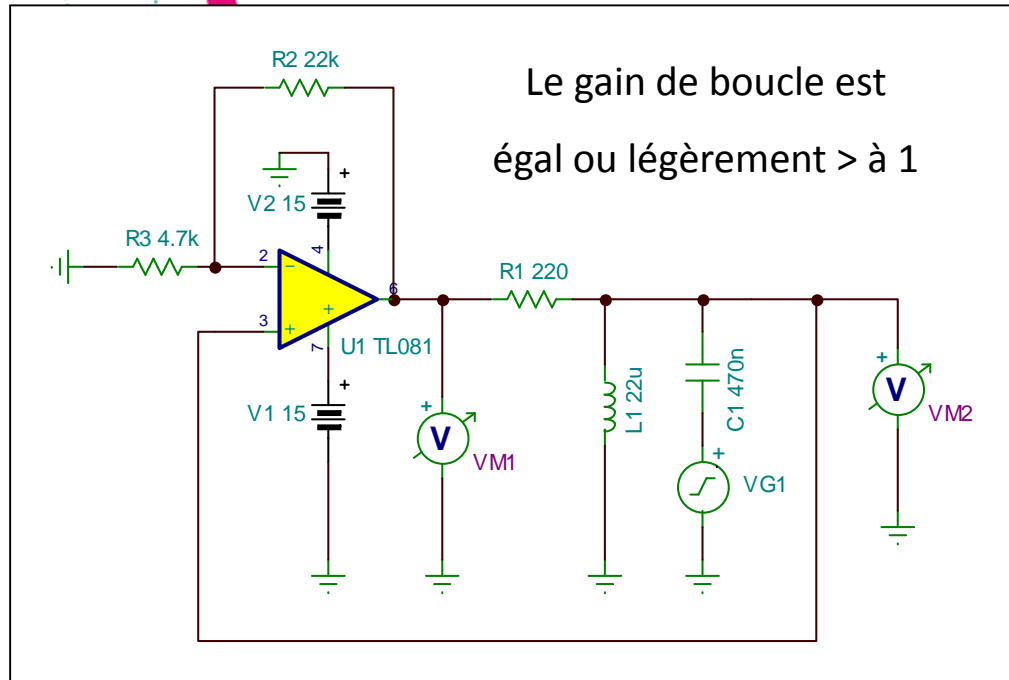


$$V_S = A_{d0}(V^+ - V^-) = A_{d0}(V^+ - V_S)$$

$$\Rightarrow V_S = \frac{A_{d0}}{1 + A_{d0}} V^+$$



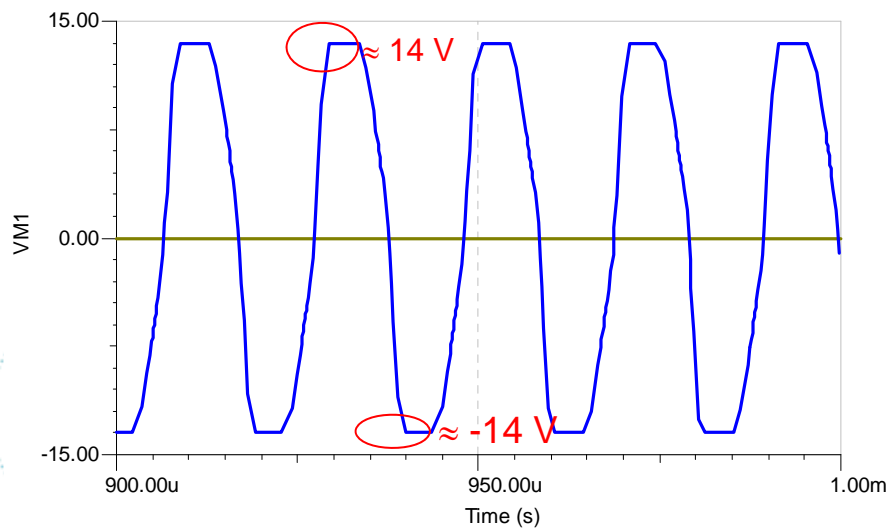
Simulation sous le logiciel TINA



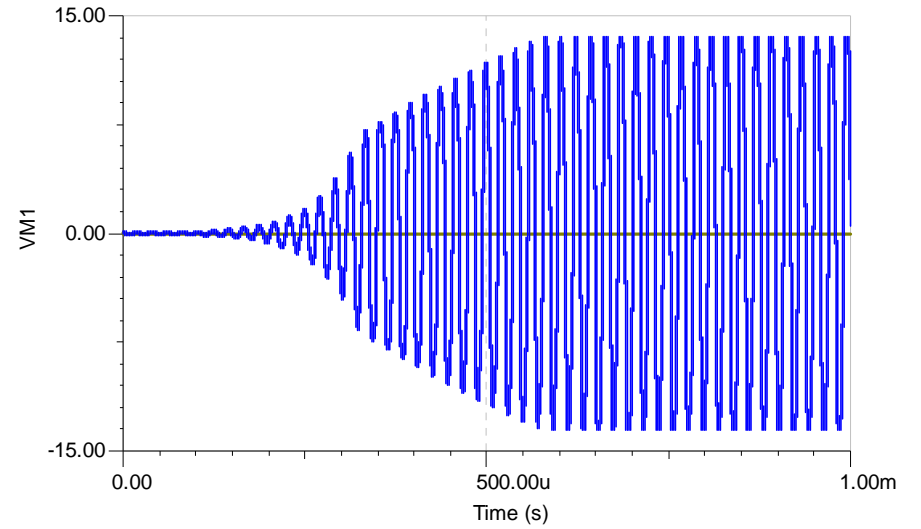
Le gain de boucle est égal ou légèrement $>$ à 1

Zoom sortie AOP (VM1)

saturation de l'étage de sortie de l'AOP

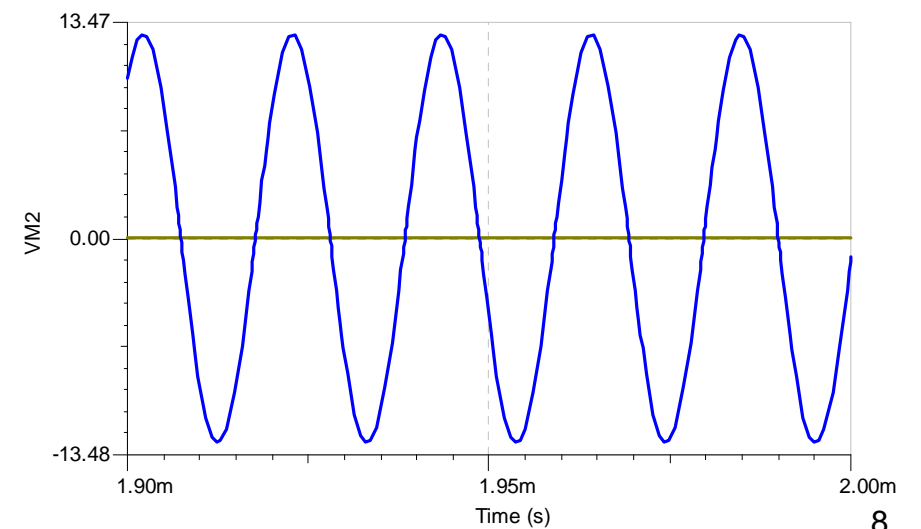


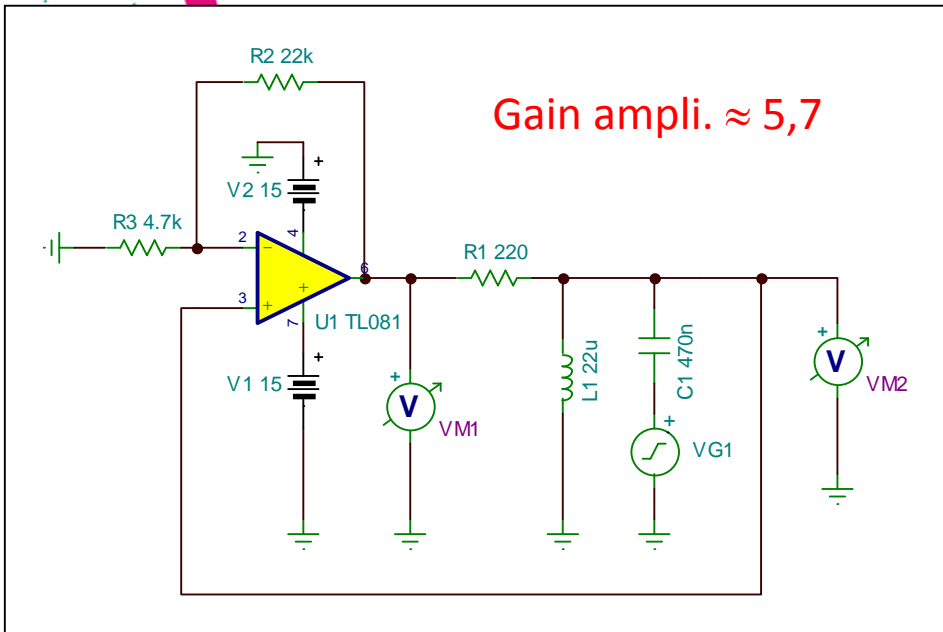
Sortie AOP VM1



Sortie filtre passe-bande (VM2)

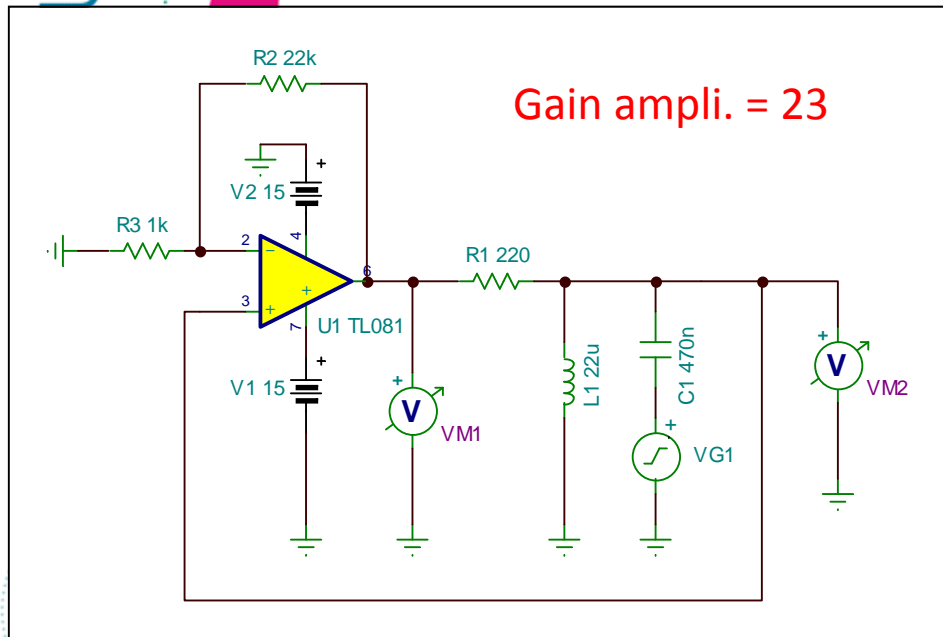
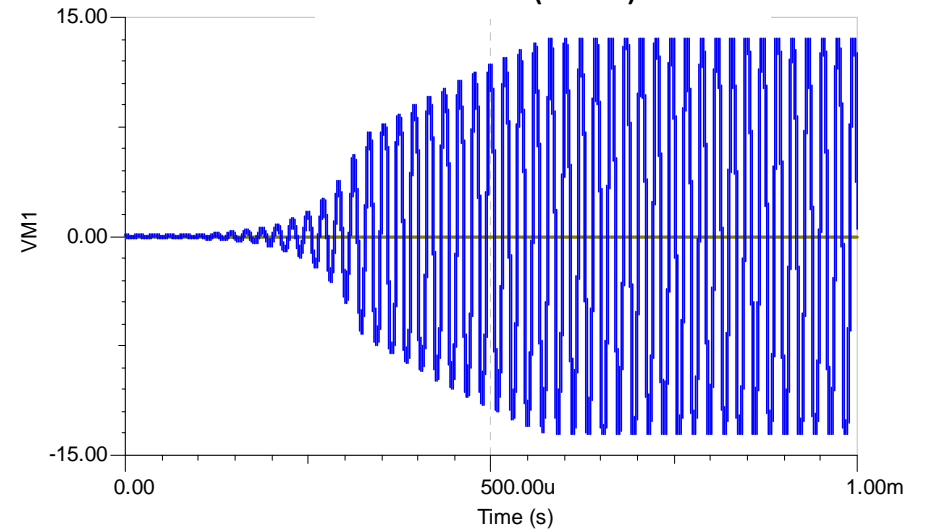
signal « quasi » sinusoïdal



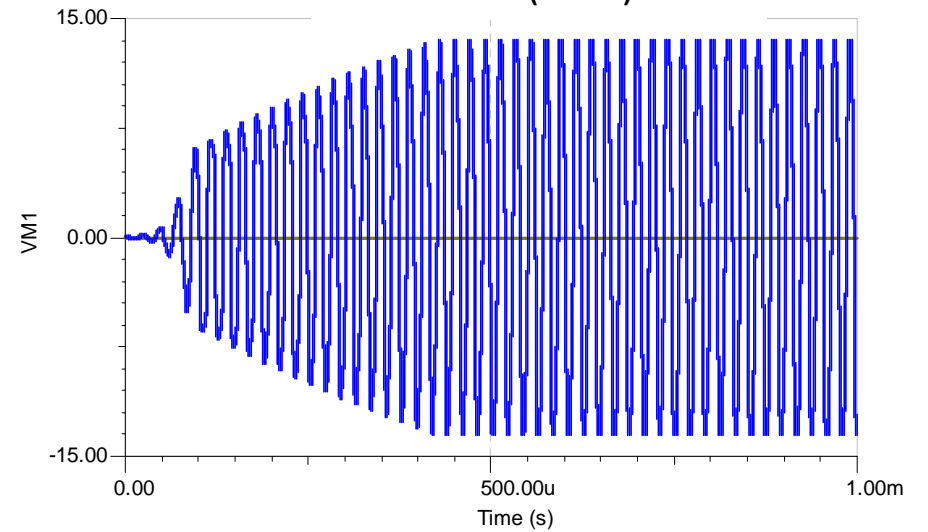


Simulation sous le logiciel TINA

Sortie AOP (VM1)

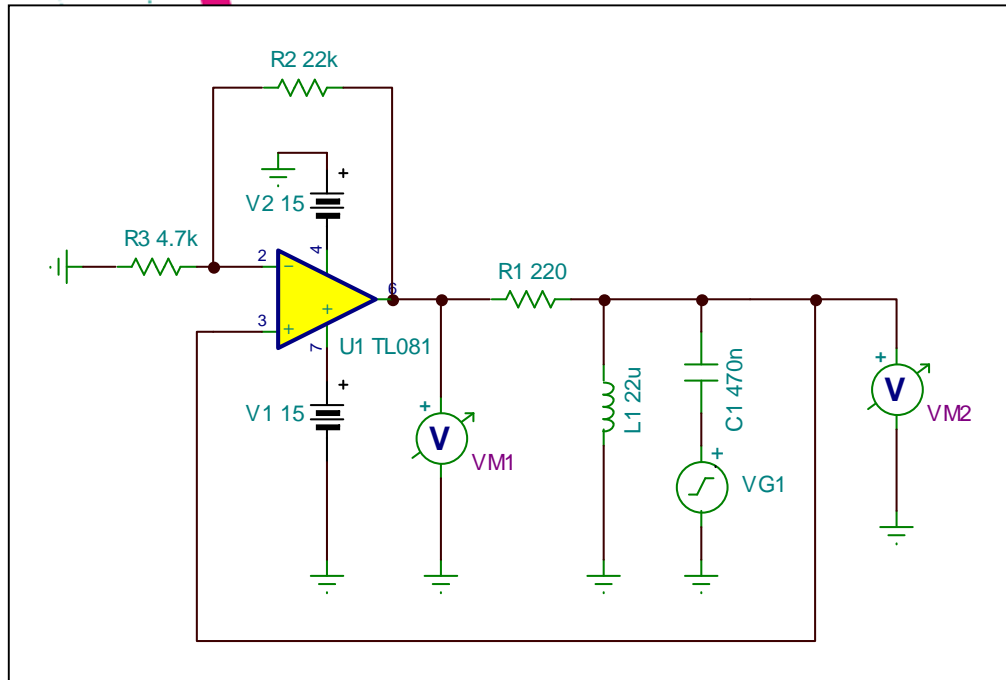


Sortie AOP (VM1)

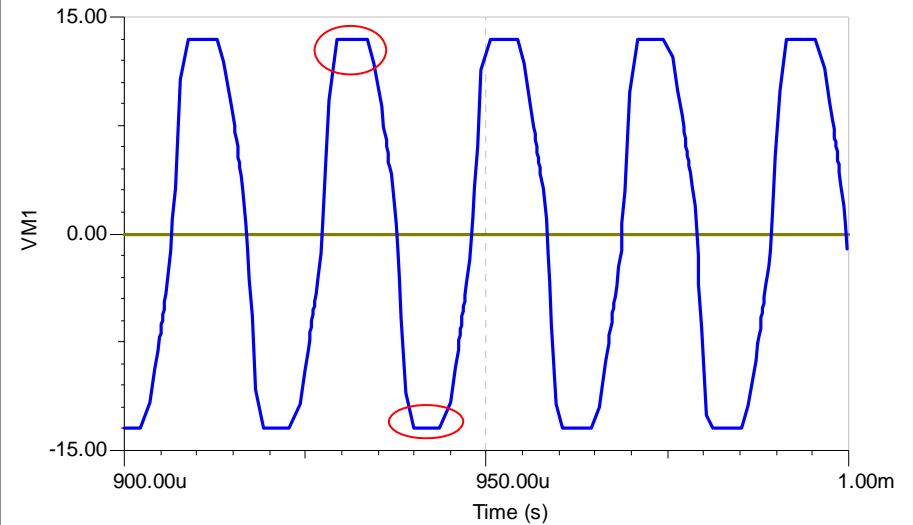


La durée du transitoire est d'autant plus petite que le gain de boucle est grand

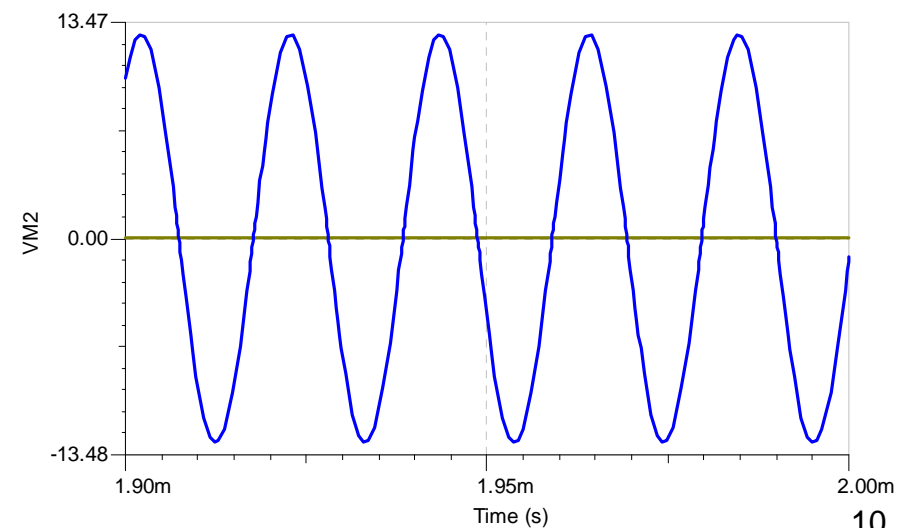
Simulation sous le logiciel TINA



sortie AOP (VM1)



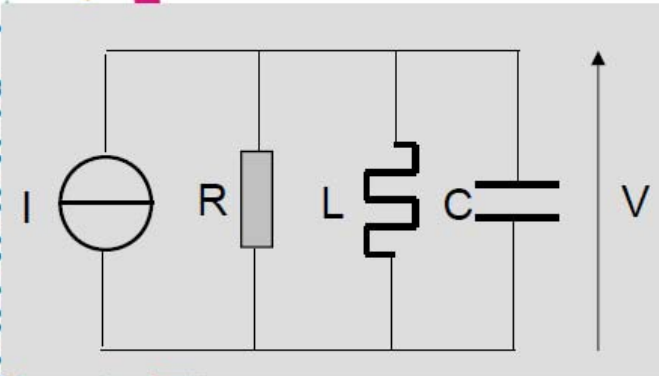
sortie filtre (VM2)



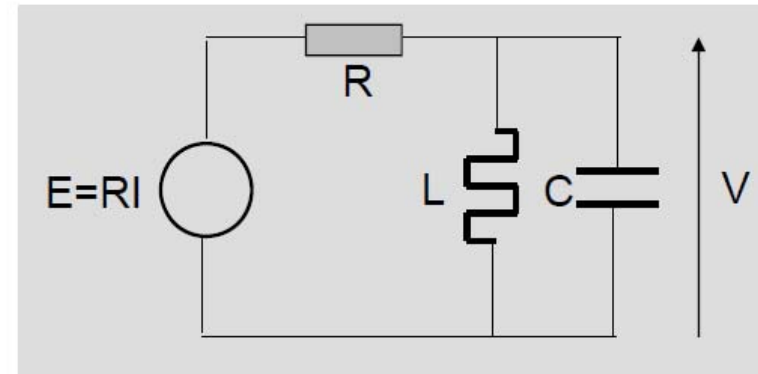
Compte tenu de la non linéarité de l'amplificateur et de la réponse en fréquence du filtre passe bande, le signal distordu.

CONCLUSION : IL EST IMPOSSIBLE DE GENERER UN SIGNAL PUREMENT SINUSOÏDAL

2- Caractéristiques principales d'un oscillateur : Le résonateur



ou



$$V = \frac{I}{\frac{1}{R} + jC\omega + \frac{1}{jL\omega}} = \frac{RI}{1 + jRC\omega + \frac{R}{jL\omega}}$$

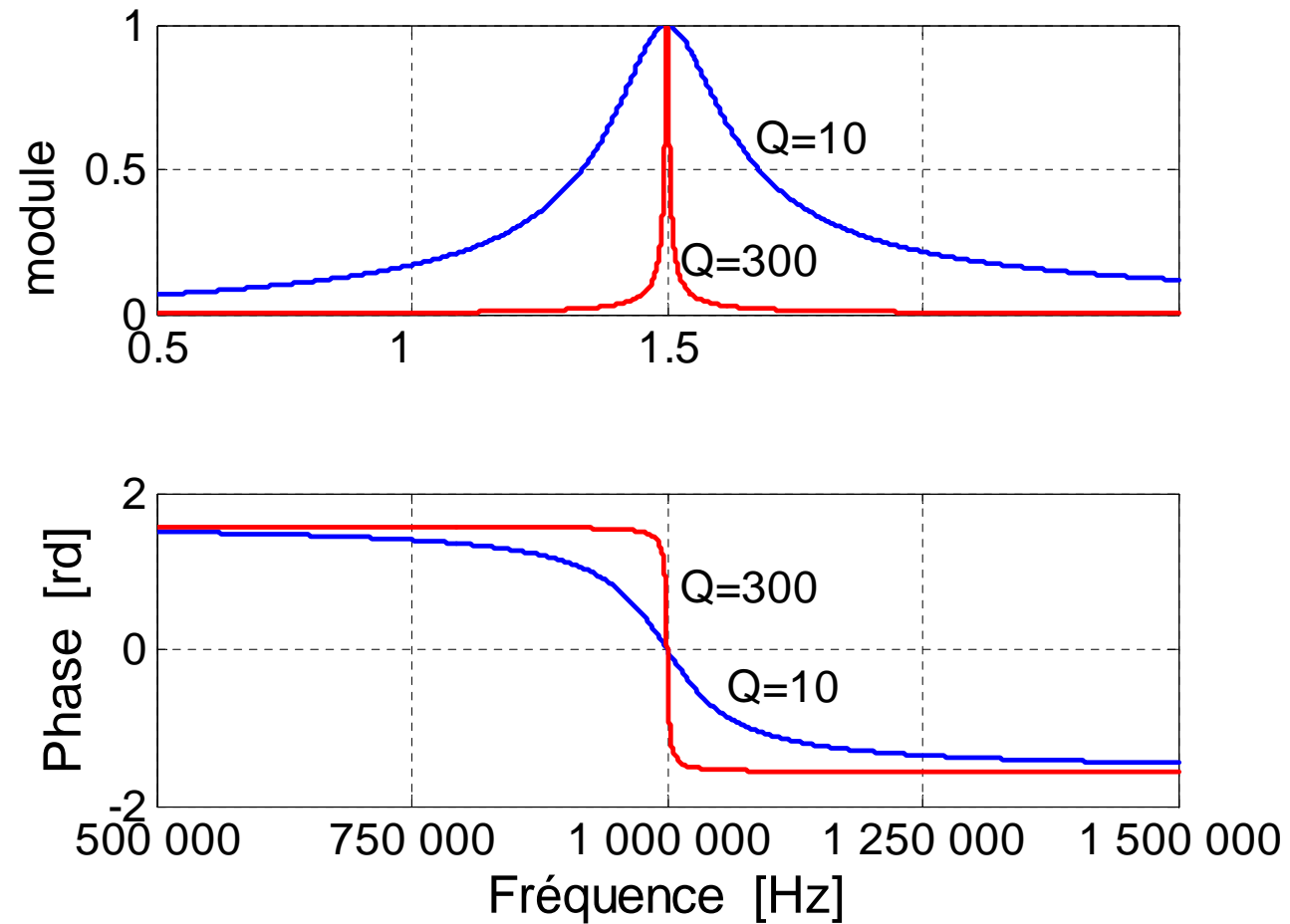
On pose : $Q = RC\omega_0$ **coefficient de qualité**, avec $LC\omega_0^2 = 1$

f_0 : fréquence de résonance

D'où le gain complexe :

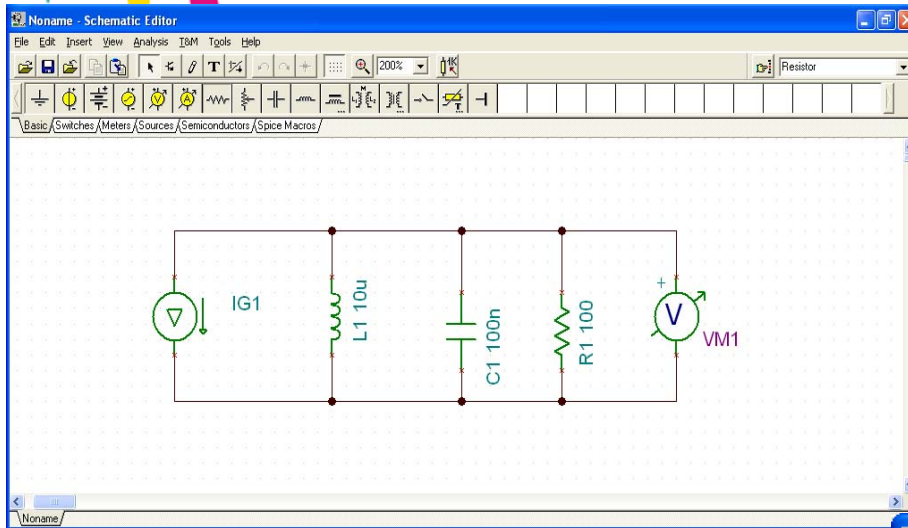
$$\frac{\underline{V}}{\underline{E}} = \frac{1}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

2- Caractéristiques principales d'un oscillateur : Le résonateur

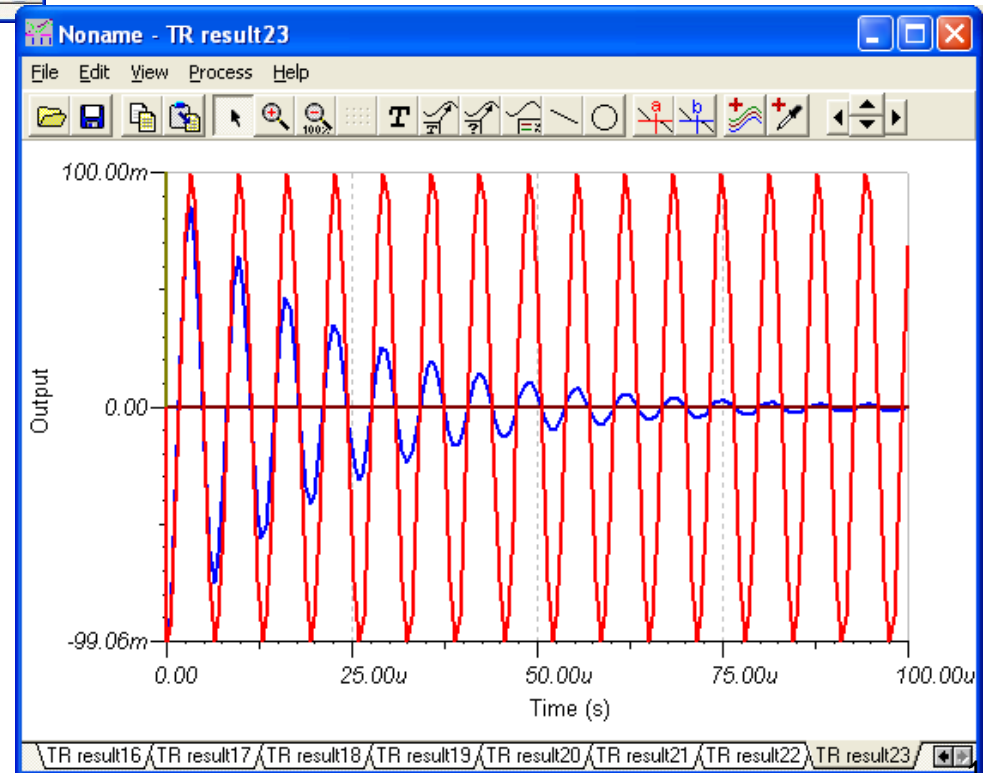


Plus le coefficient de qualité Q est élevé, plus le pic de résonance est étroit et plus la **phase varie rapidement au voisinage de la fréquence de résonance f_0** .

2- Caractéristiques principales d'un oscillateur : Le résonateur



Réponse d'un circuit R-L-C à une impulsion de courant

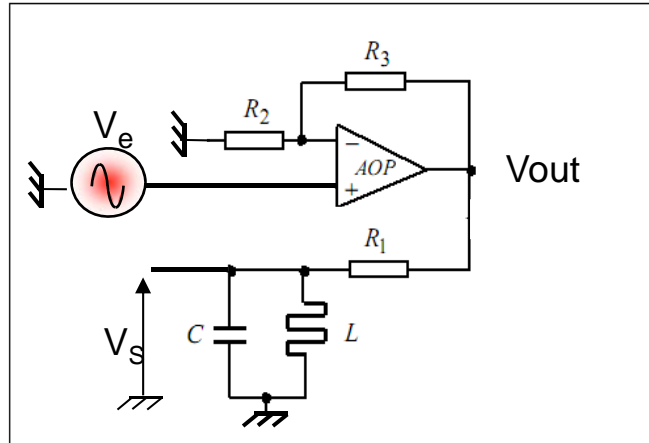


— Q infini

— Q = 10

2- Caractéristiques principales d'un oscillateur : Limitations

- Influence du facteur Q du résonateur sur la fréquence des oscillations



Gain en boucle ouverte de l'AOP

$$V_{out} = \frac{A_{d0}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}} (V^+ - V^-)$$

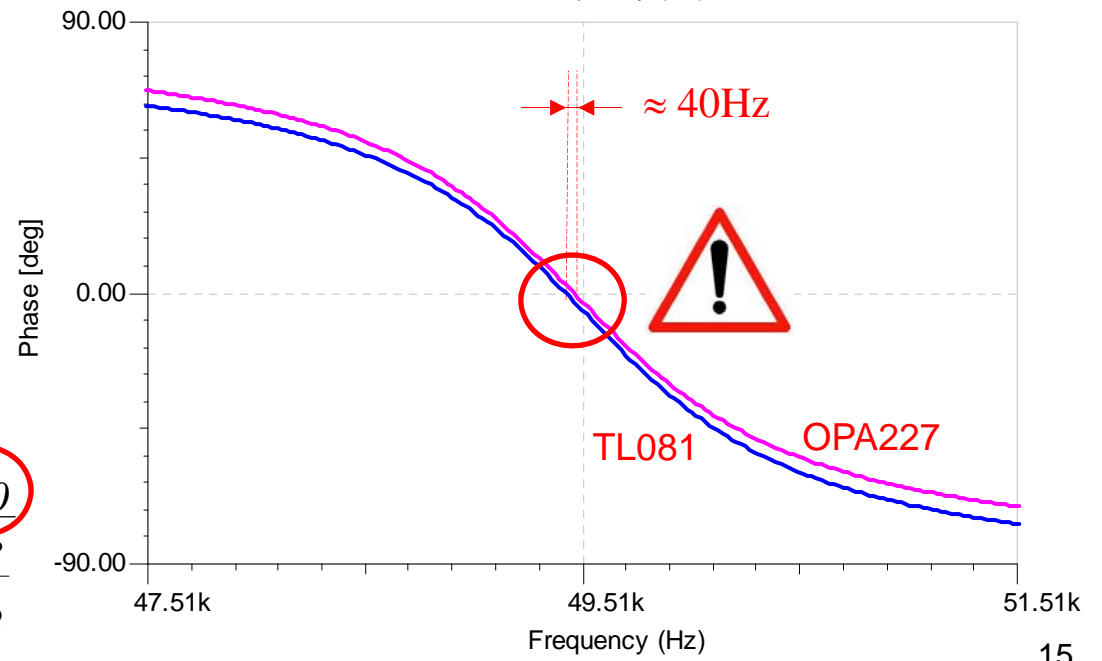
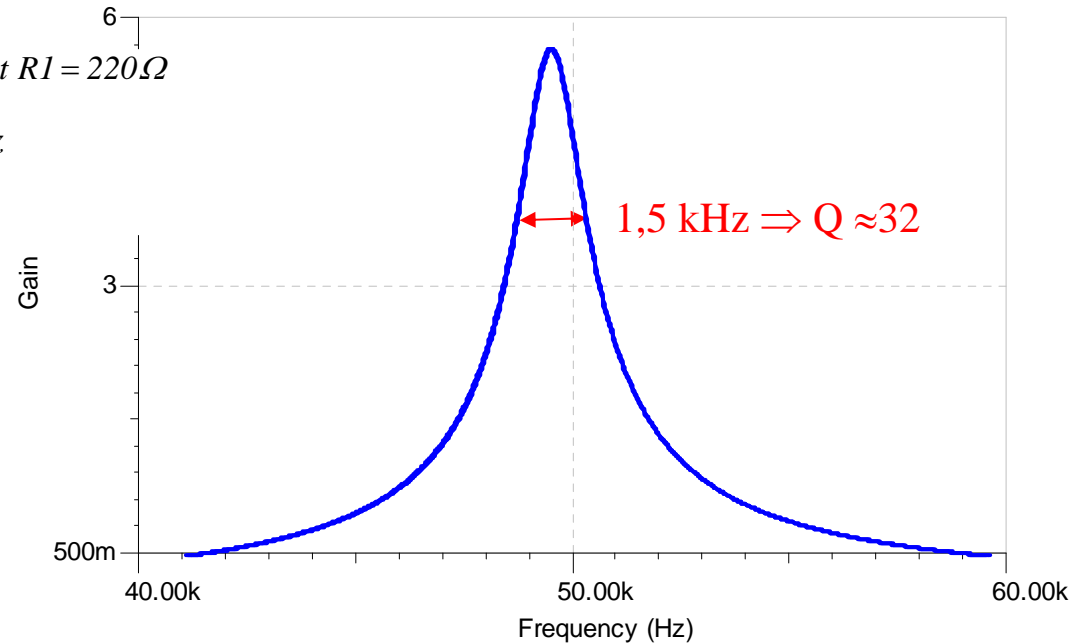
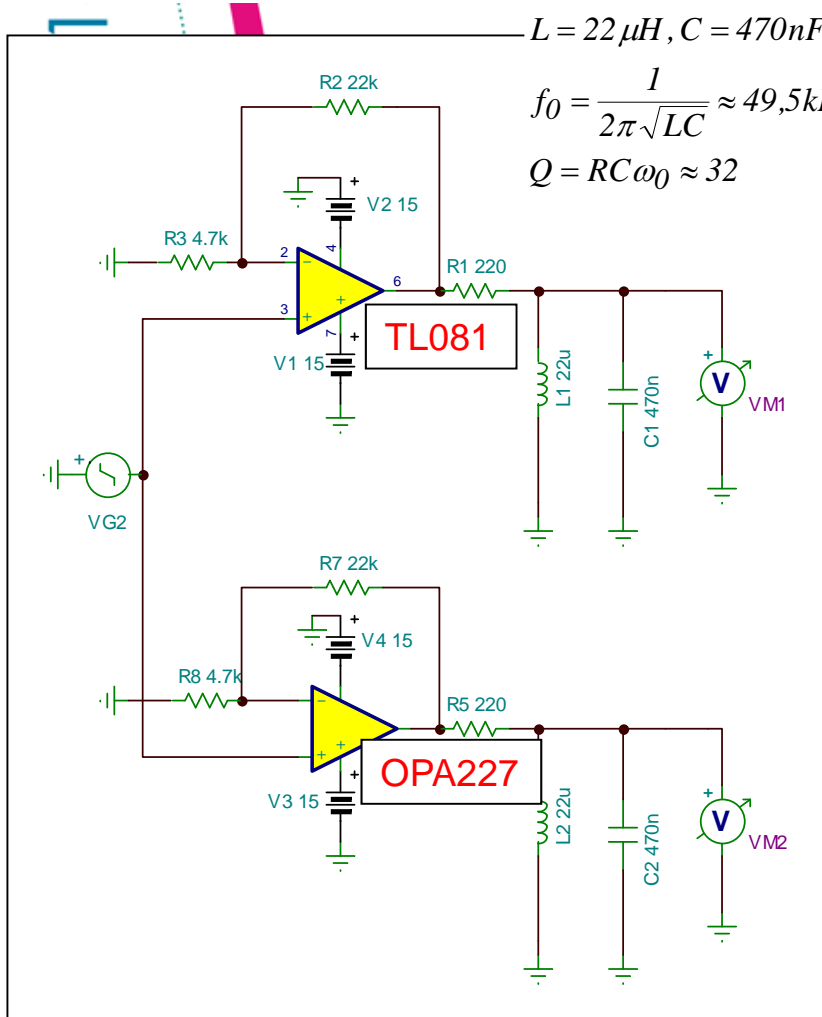
$$\text{Gain de boucle : } A(\omega)\beta(\omega) = \frac{V_S}{V_e} \approx \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) \left(\frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{-3dB}}} \right) \frac{j\omega \frac{\omega_0}{Q}}{(-\omega^2 + \omega_0^2) + j\omega \frac{\omega_0}{Q}}$$

$$\text{d'où la pulsation des oscillations : } \omega_{osc} = \omega_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega_0}{Q\omega_{-3dB}}}} \quad \text{avec : } \omega_{-3dB} = \frac{\omega_c A_{d0}}{1 + \frac{R_3}{R_2}}$$

Intérêt d'un résonateur avec un fort coefficient de qualité Q : $\omega_{osc} \approx \omega_0$

- Influence des caractéristiques de l'AOP sur la fréquence des oscillations

Simulation sous le logiciel TINA



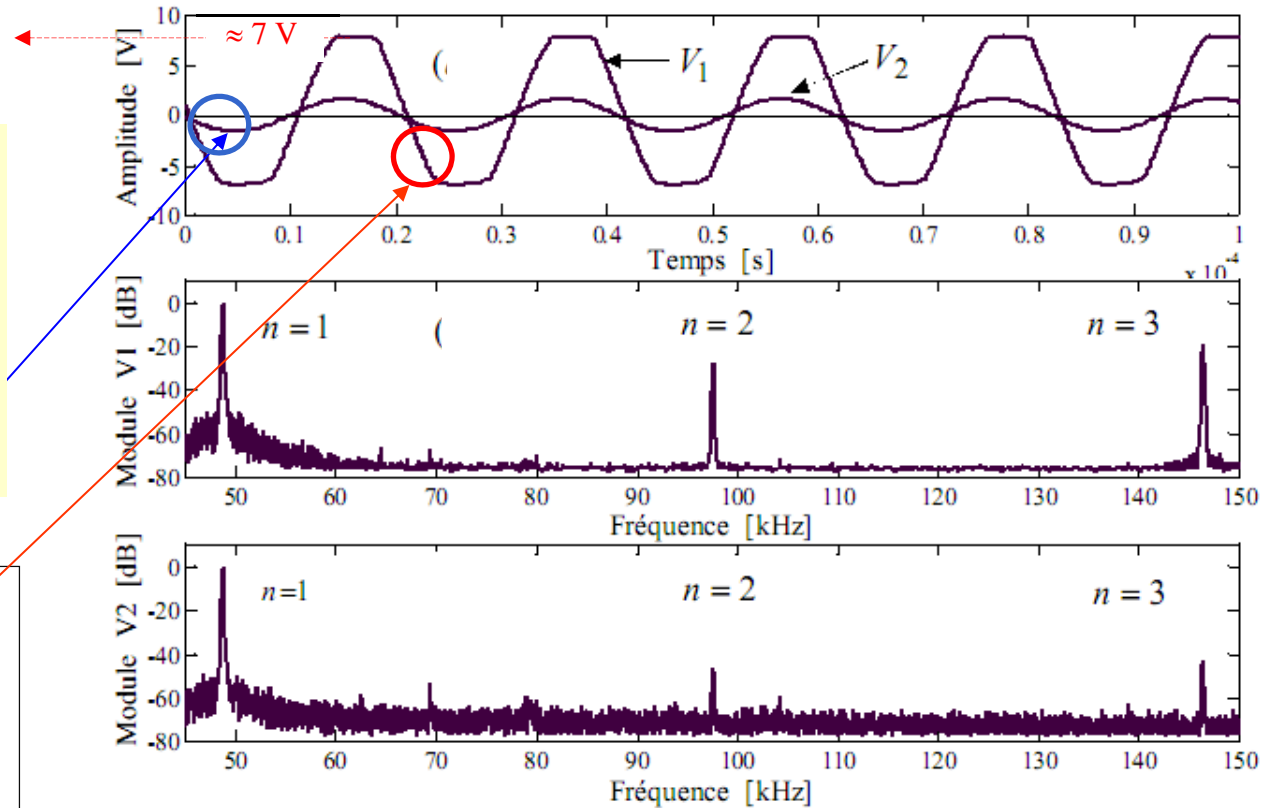
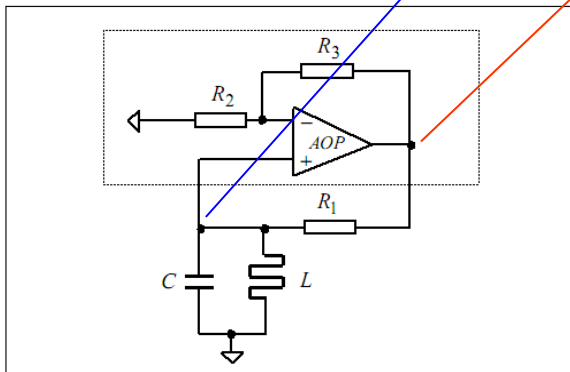
$$\omega_{osc} = \omega_0 \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\omega_0}{Q\omega_{-3dB}}}}$$

$$\omega_{-3dB} = \frac{\omega_c A_{d0}}{1 + \frac{R_3}{R_2}}$$

2- Caractéristiques principales d'un oscillateur : Limitations

- Influence des caractéristiques de l'AOP et de la charge sur la forme et la distorsion des signaux

Les saturations à $\approx 7V$ et $\approx -7V$ sont dues à la limitation en courant de la sortie de l'AOP et aux caractéristiques des composants L et C constituant le réseau de réaction.





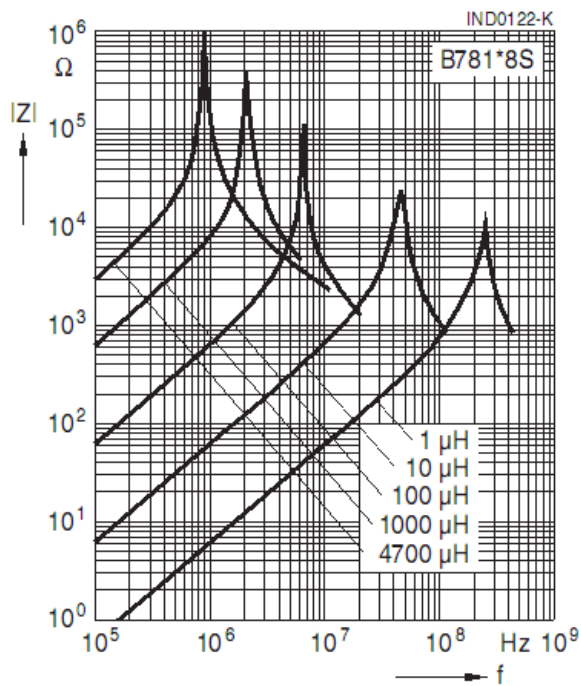
2- Caractéristiques principales d'un oscillateur : Limitations

- Influence des pertes des composants du résonateur

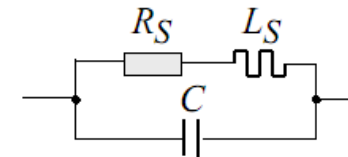


L_R μH	Tolerance ¹⁾	Q_{min}	f_0 MHz	I_R mA	R_{max} Ω	$f_{\text{res, min}}$ MHz
22		55	2.52	560	0.74	13

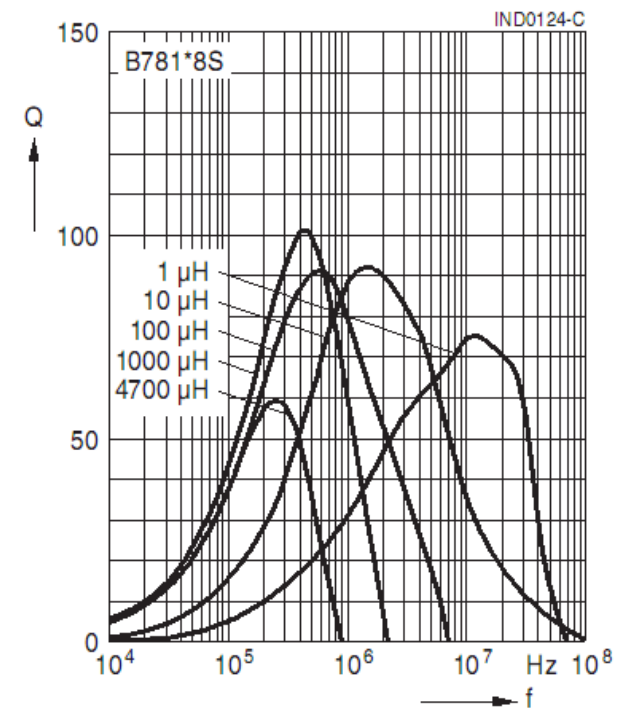
Impedance $|Z|$ versus frequency f
 measured with impedance analyzer Agilent 4294A or S-parameter network analyzer Agilent 8753ES, typical values at +20 °C



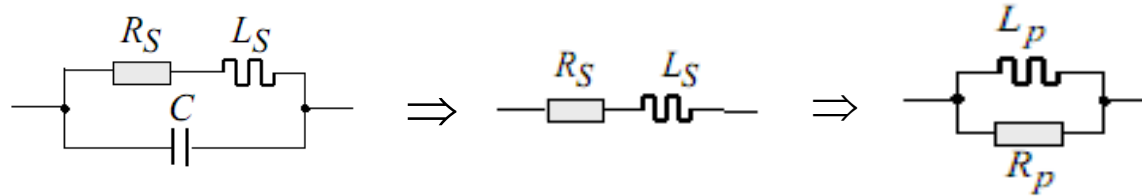
Modèle électrique de l'inductance



Q factor versus frequency f
 measured with impedance analyzer Agilent 4294A, typical values at +20 °C



Si $f \ll$ fréquence de résonance



avec $R_p = R_S \left(1 + \left(\frac{L_S \omega}{R_S} \right)^2 \right)$ et $L_p = L_S \left(1 + \left(\frac{R_S}{L_S \omega} \right)^2 \right)$

Application numérique pour $f \approx 50$ kHz :

$$R_p = 0,75 \left(1 + \left(\frac{22 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10^3}{0,75} \right)^2 \right) \approx 64 \Omega$$

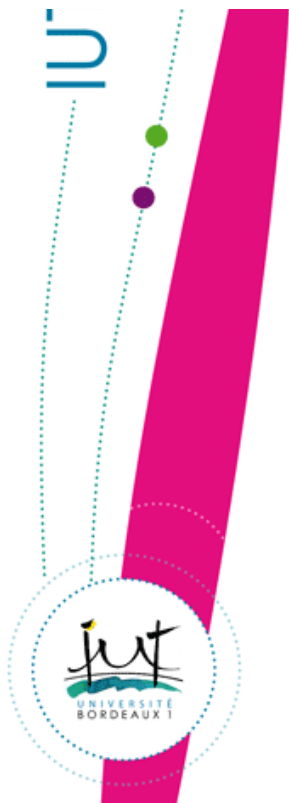
$$L_p = 22 \cdot 10^{-6} \left(1 + \left(\frac{0,75}{22 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10^3} \right)^2 \right) \approx 22 \mu H$$

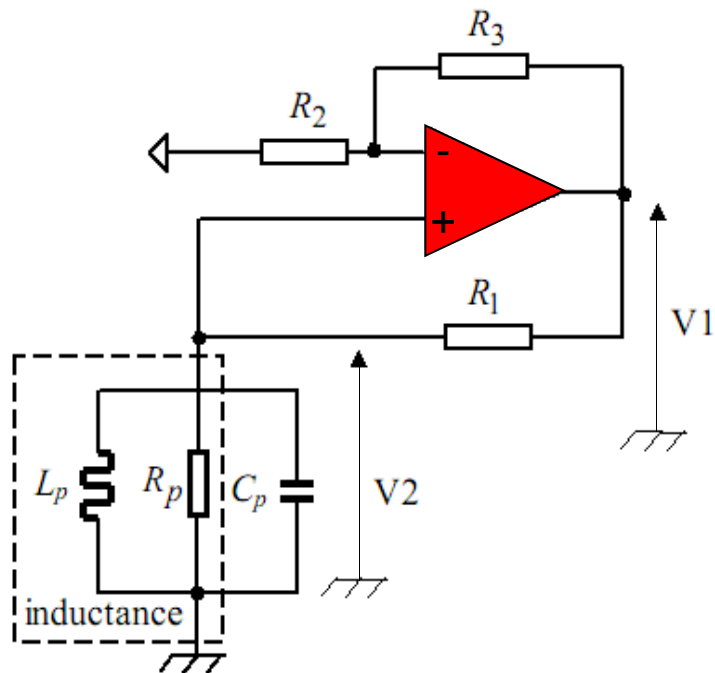
Conclusion : R_p n'est pas négligeable

et la fréquence $f_{osc} < f_0$

$$f_{osc} = f_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{C R_S^2}{L_S}}$$

$$\text{avec } f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_S C}}$$





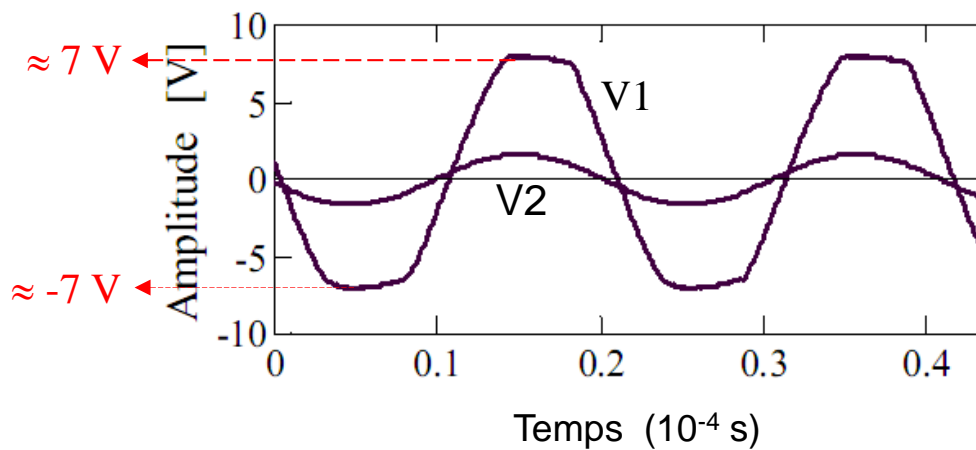
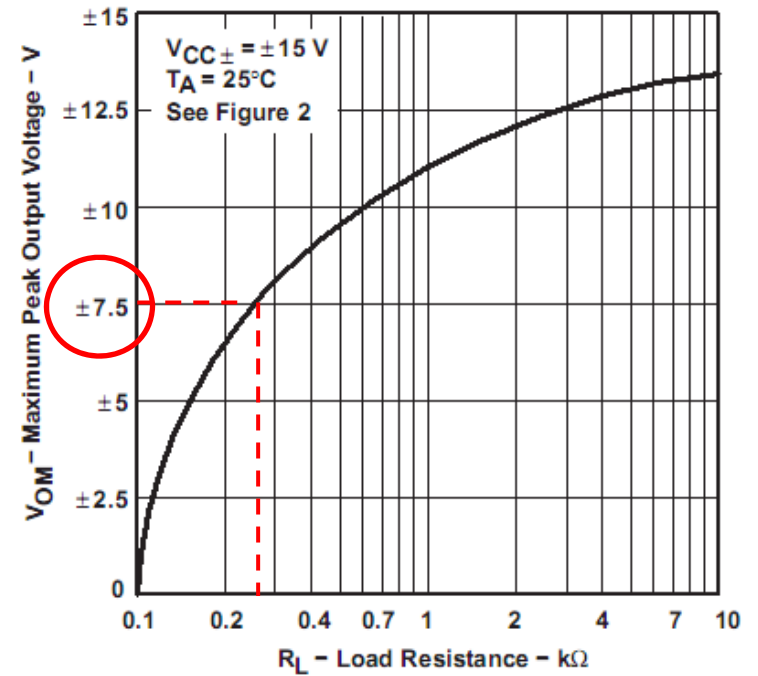
A la résonance (≈ 50 kHz), la charge de l'amplificateur opérationnel est égale à :

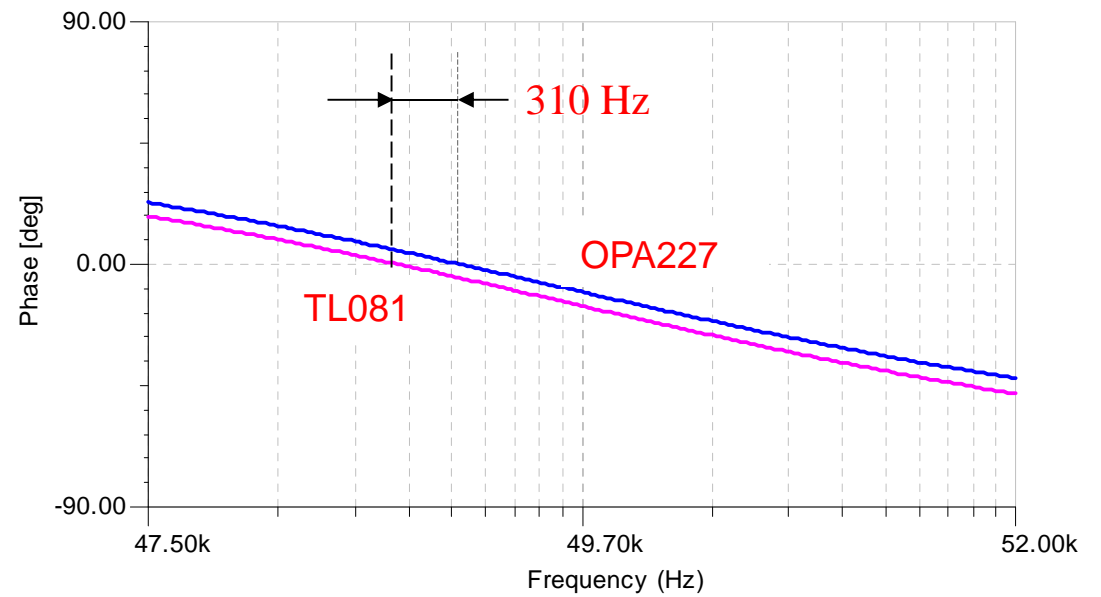
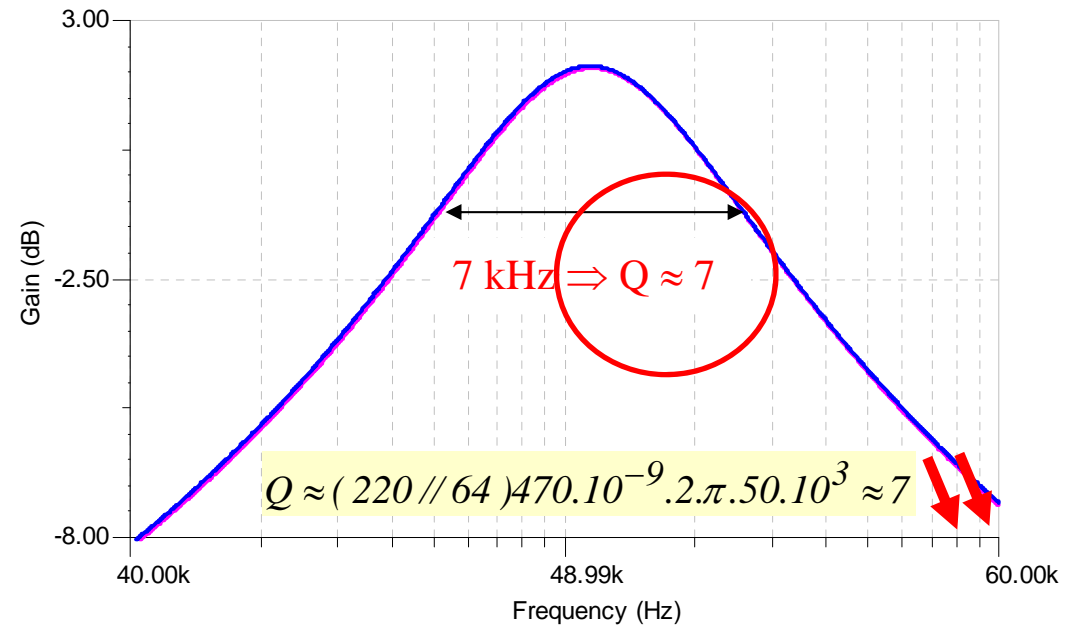
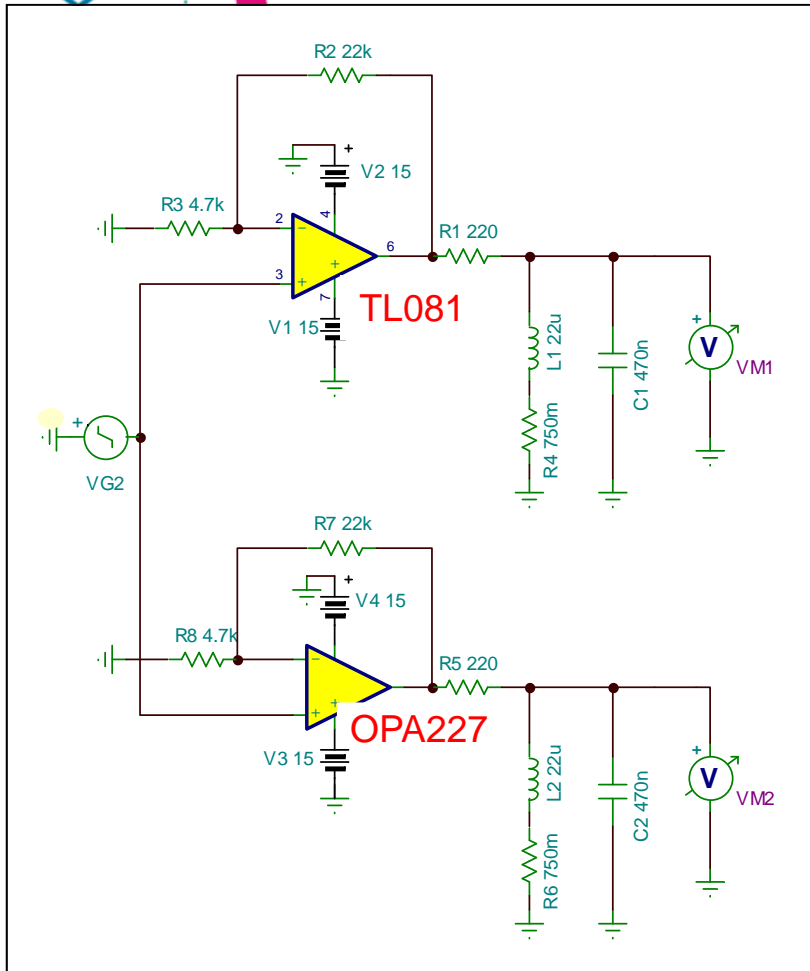
$$R_1 + R_p = 220 + 64 = 284 \Omega$$



TL081

MAXIMUM PEAK OUTPUT VOLTAGE VS LOAD RESISTANCE

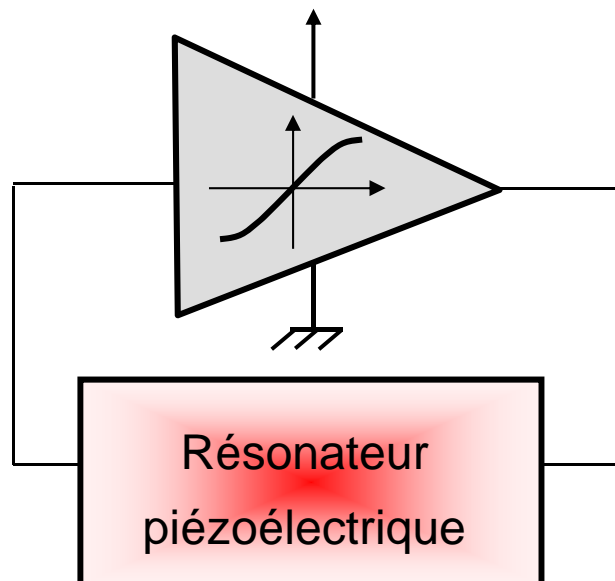




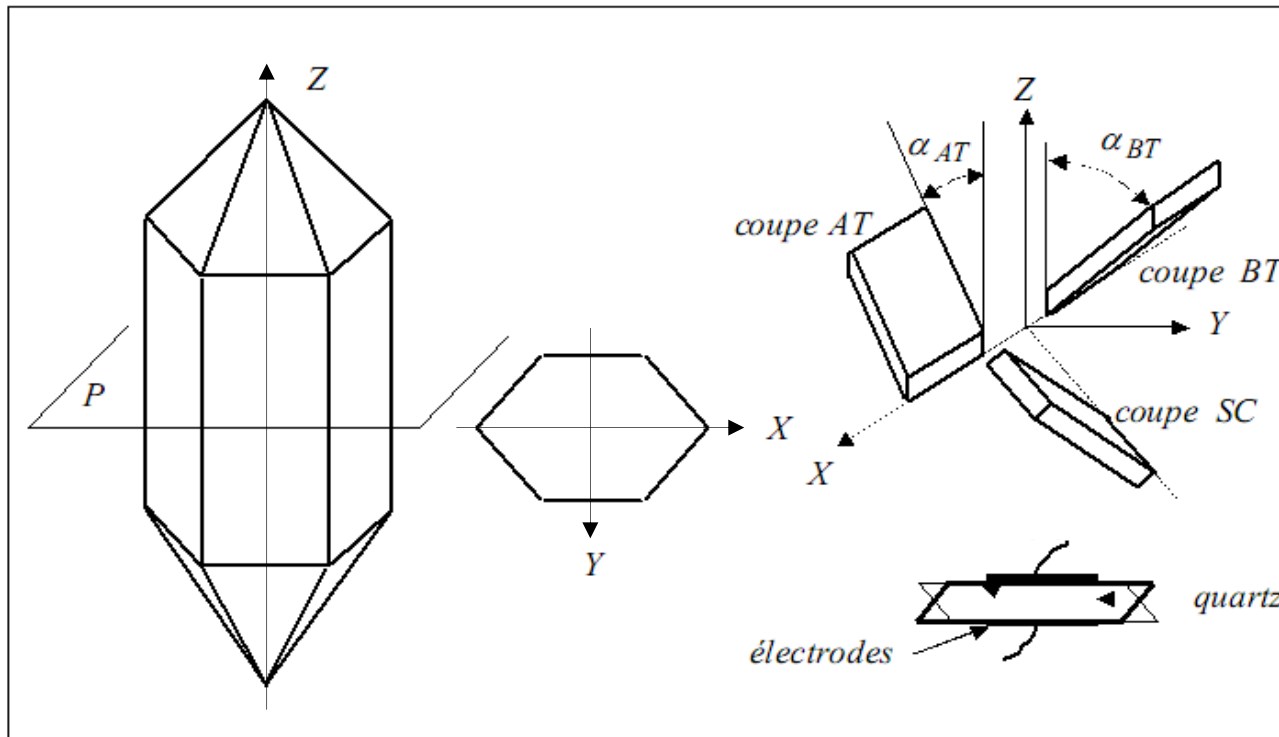
- Synthèse et bilan

Plus le coefficient de qualité Q du résonateur est faible, plus la fréquence des oscillations est dépendante des caractéristiques de l'AOP, d'où la nécessité de trouver un résonateur avec une très forte valeur de Q .

Solution => Utilisation de résonateurs piézoélectriques
(ex. quartz)



3- L'oscillateur à quartz



Cristal de quartz naturel



Disque de quartz synthétique

Fréquence de résonance

$$f_r = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu_q}{\rho_q}} \frac{1}{t_q}$$

masse volumique

$$\rho_q = 2650 \text{ kgm}^{-3}$$

coefficient de cisaillement

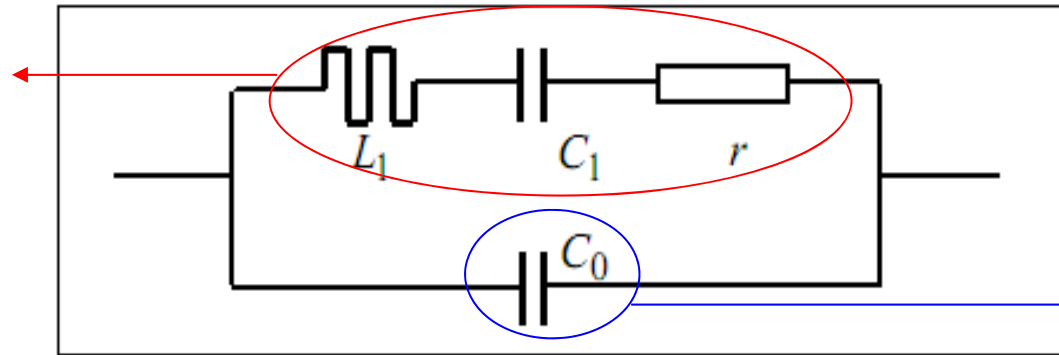
$$\mu_q = 2.94 \times 10^{10} \text{ Nm}^{-2}$$

quartz à 5 MHz $\Rightarrow t_q = 333 \mu\text{m}$



3- L'oscillateur à quartz

branche motionnelle
due à l'effet
piézoélectrique



capacité
géométrique

Impédance électrique d'un résonateur piézoélectrique

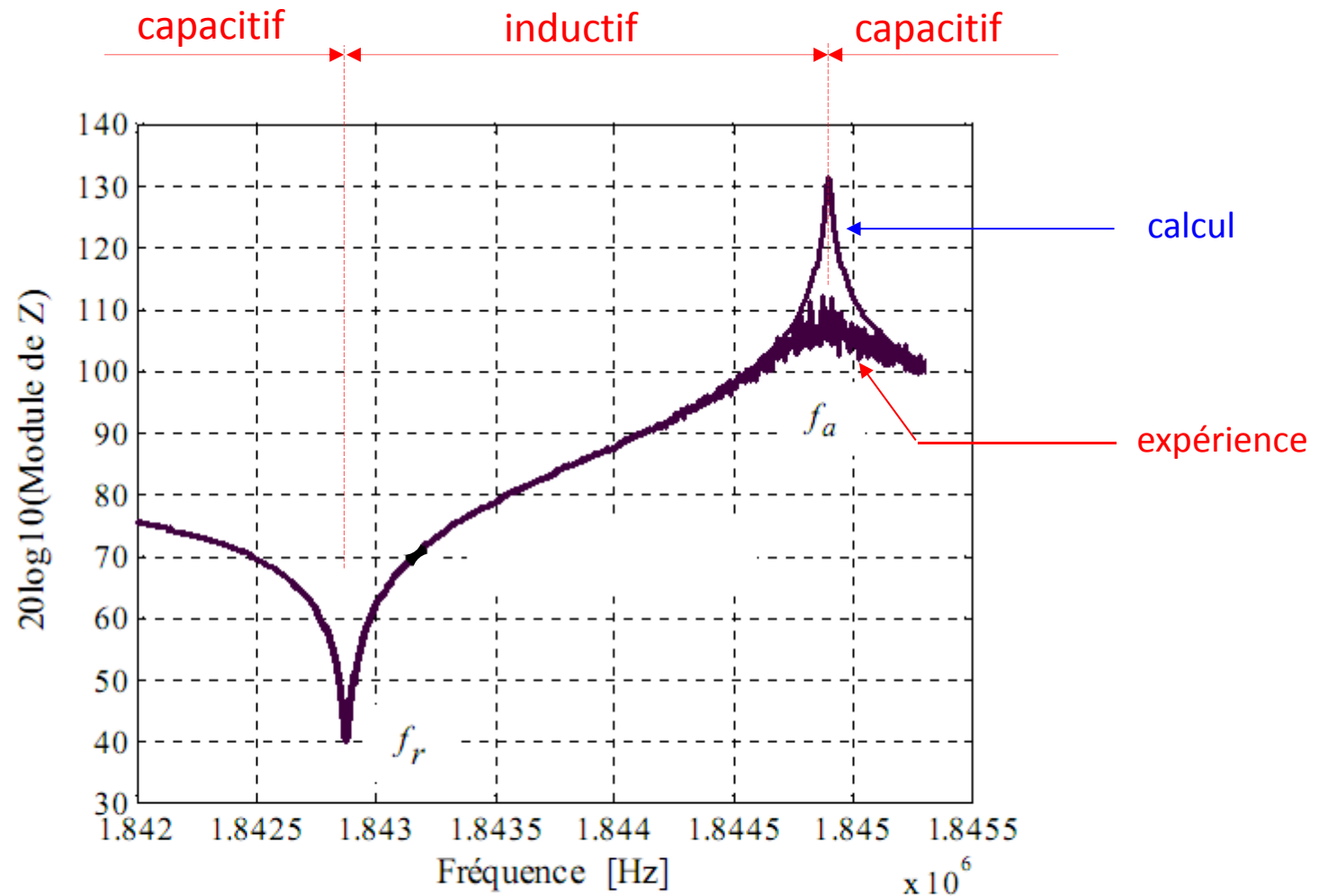
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \text{ et } f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_0} \right)} \text{ avec } f_a = f_r \left(1 + \frac{C_1}{C_0} \right)^{1/2}$$

fréquence
de résonance

fréquence
d'antirésonance

A la fréquence de résonance f_r , le quartz est électriquement équivalent à une résistance r , c'est quasiment un court-circuit alors qu'à la fréquence d'antirésonance f_a c'est quasiment un circuit ouvert.

3- L'oscillateur à quartz



Module de l'impédance Z au voisinage des fréquences de résonance et d'antirésonance du fondamental

3- L'oscillateur à quartz

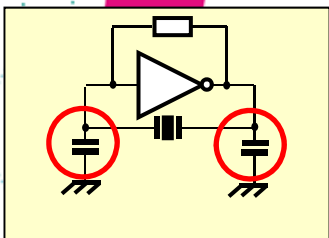
Paramètres	200kHz	2MHz	30MHz	90MHz
	Mode fondamental		Harmonique 3	Harmonique 5
r (en Ω)	2000	100	20	40
L_1 (en H)	27	0,52	0,011	0,006
C_1 (en fF)	24	12	2,6	0,5
C_0 (en pF)	9	4	6	4
Q	$\approx 20\ 000$	$\approx 100\ 000$	$\approx 100\ 000$	$\approx 100\ 000$

Valeurs typiques des paramètres r , L_1 , C_1 et C_0

NB : avec des composants discrets, Q est de l'ordre de q.q. 100

La valeur inscrite sur le boîtier du quartz correspond à la fréquence nominale, c'est la fréquence pour laquelle il est prévu d'osciller.

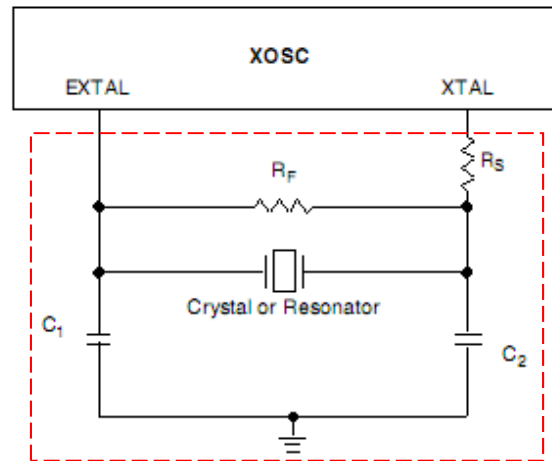
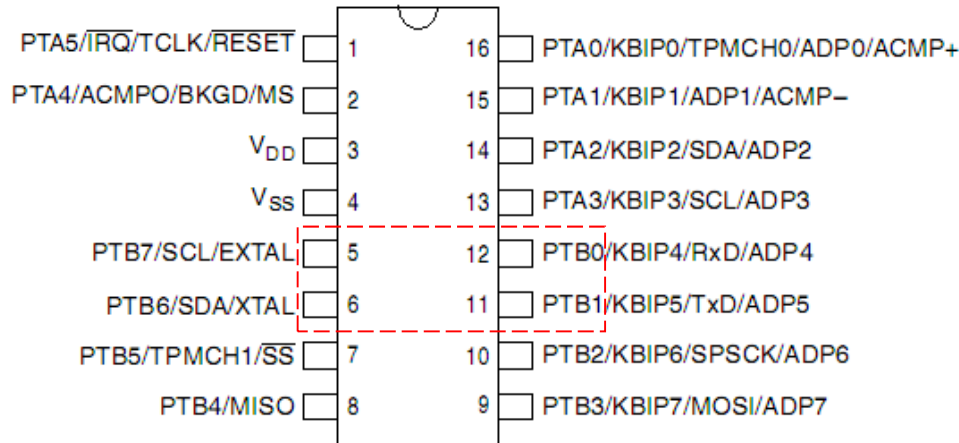
Certains montages sont conçus pour que le quartz oscille à la fréquence de résonance f_r , on parle dans ce cas de **résonance série (series resonant)**, d'autres montages sont conçus pour que le quartz oscille entre f_r et f_a , c-à-d là où le quartz à un comportement selfique, on parle dans ce cas de **résonance parallèle (parallel resonant)**, le plus courant. Dans ce dernier cas, le constructeur spécifie la valeur de la capacité de charge (**load capacitance**)





3- L'oscillateur à quartz

HCS08
Microcontrollers



Oscillateur dit de « Pierce »
pour systèmes numériques

Feedback resistor				
Low range (32 kHz to 38.4 kHz)	R_F	10		M Ω
High range (1 MHz to 16 MHz)		1		M Ω

3- L'oscillateur à quartz

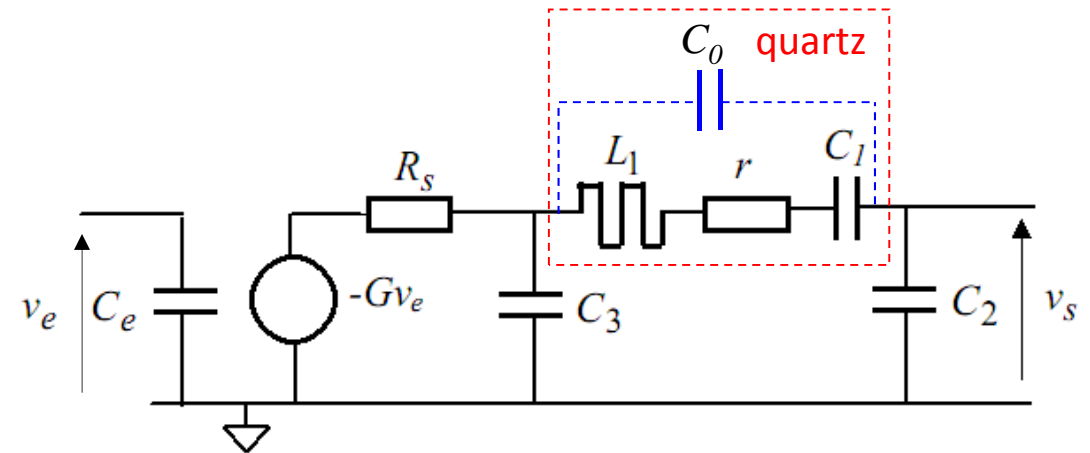
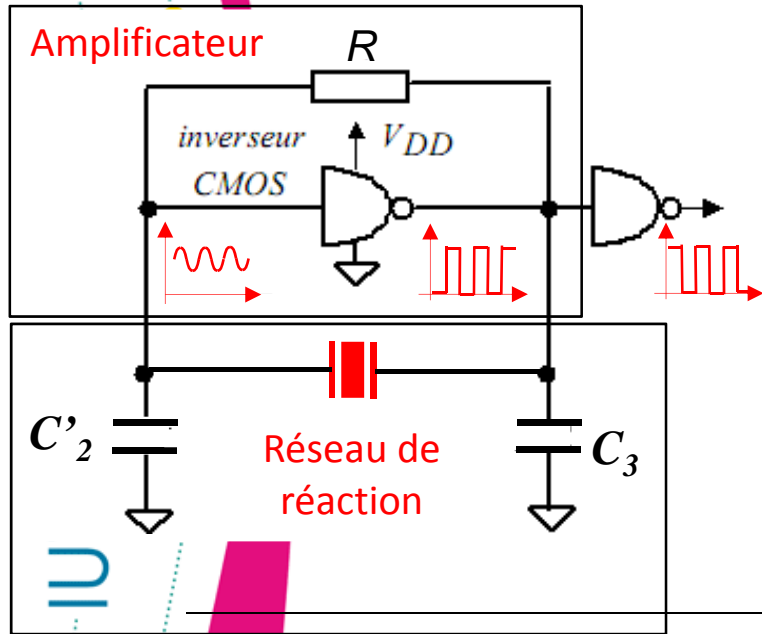


Schéma équivalent pour le calcul du gain en boucle ouverte

Condition d'oscillation :

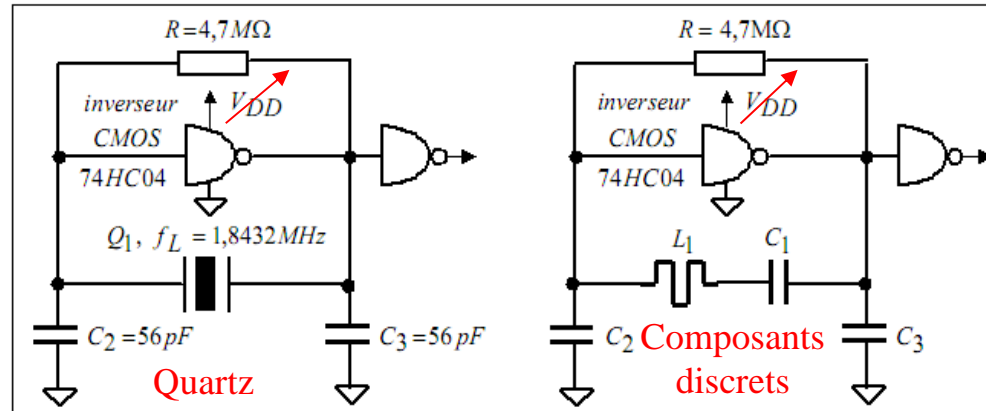
$$\frac{v_s}{v_e} = 1 \begin{cases} f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_{eq}}} \left[1 + \frac{r C_{eq}}{R_S C_3} \right]^{1/2} \\ G \frac{C_3}{C_2} > \left[1 + \frac{r}{R_S} + \frac{r R_S C_3^2}{L_1 C_{eq}} + \frac{r^2 C_3}{L_1} \right] \end{cases}$$

avec : $\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$ et $C_2 = C_2' + C_e$

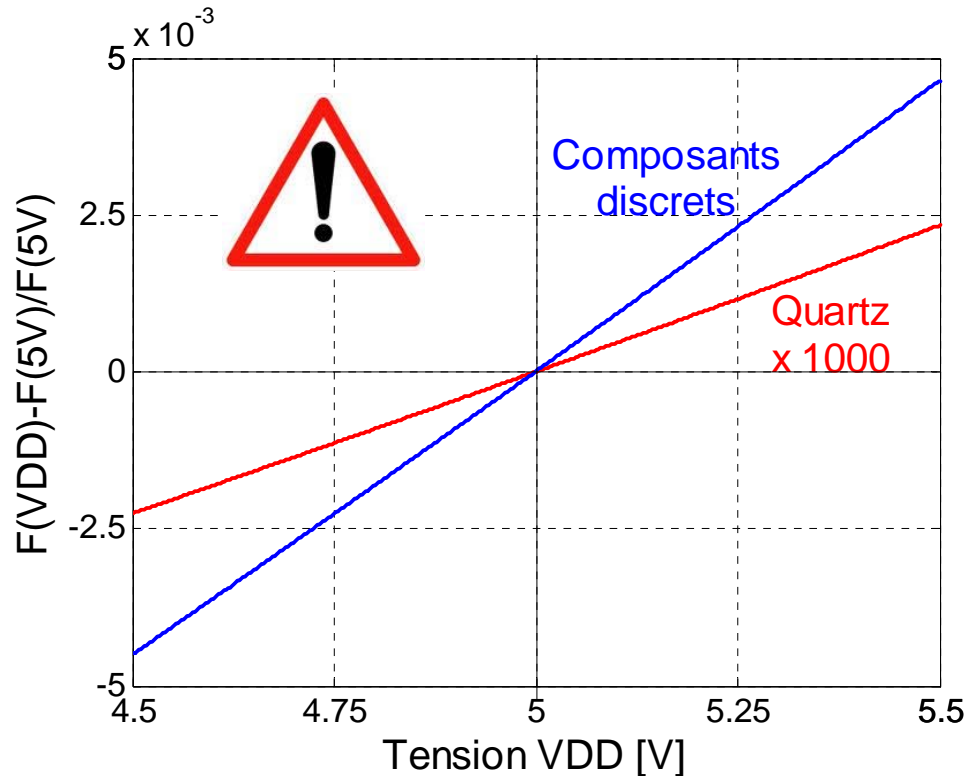
La fréquence des oscillations ne dépend quasiment que des caractéristiques du résonateur



3- L'oscillateur à quartz



Les fréquences d'oscillation des deux montages sont \approx identiques



La variation relative de fréquence est entre 100 et 1000 fois plus faible avec un quartz :

- $Q_{\text{quartz}} \approx 10^5$
- $Q_{\text{composants discrets}} \approx 50 - 100$