centralelille

Génération de signaux

Olivier Bou Matar, Yannick Dusch, Cécile Ghouila Houri, Marc Goueygou, Philippe Pernod, Bogdan Piwakowski, Cathy Sion, Abdelkrim Talbi, Nicolas Tiercelin

Électronique

北航中法工程师学院
Centrale Pékin

centralelille

Plan du cours

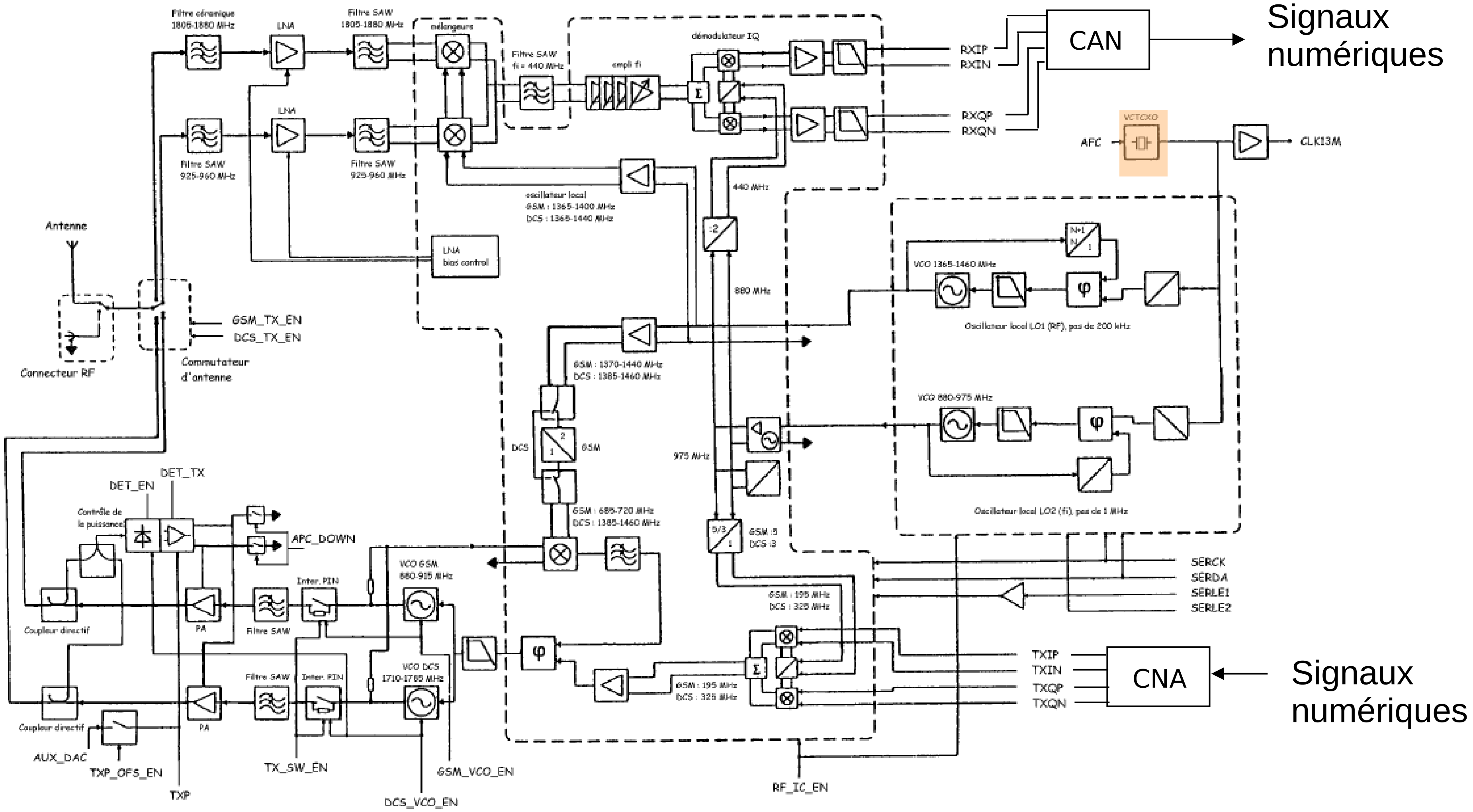
1) Introduction

2) Oscillateurs sinusoïdaux

3) Oscillateurs à relaxation

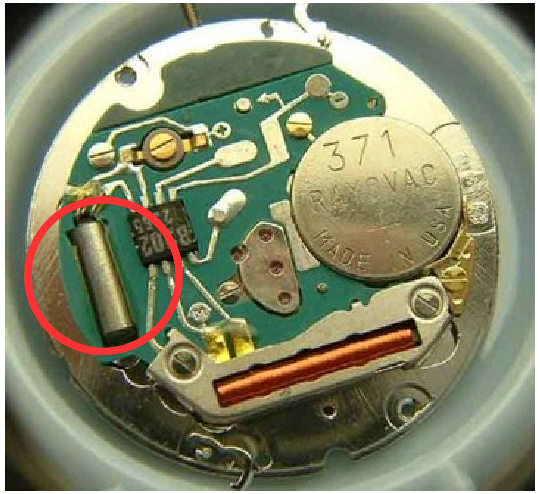
Introduction

Source : Jean-Philippe Muller



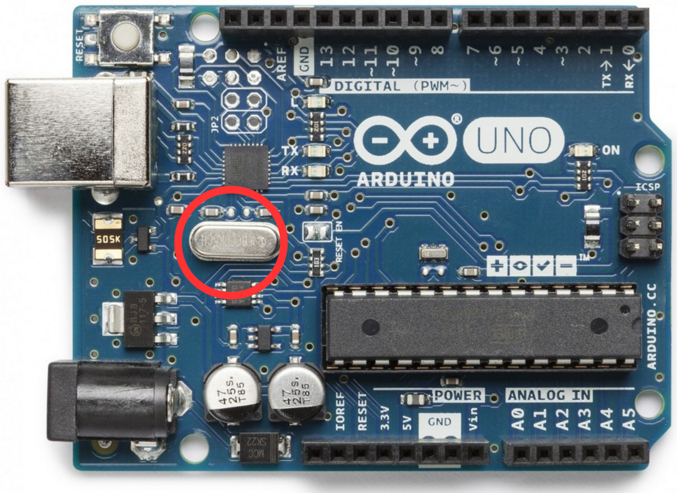
Introduction

Montre à quartz



Source: http://www.atimelyperspective.com

Arduino Uno

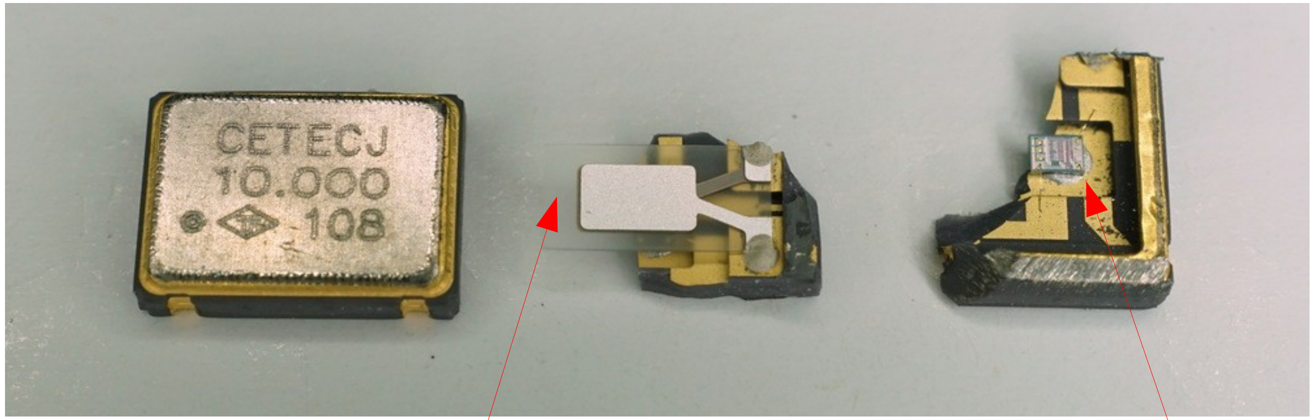


Oscillateur 5G 10-43GHz

Source: Pasternack

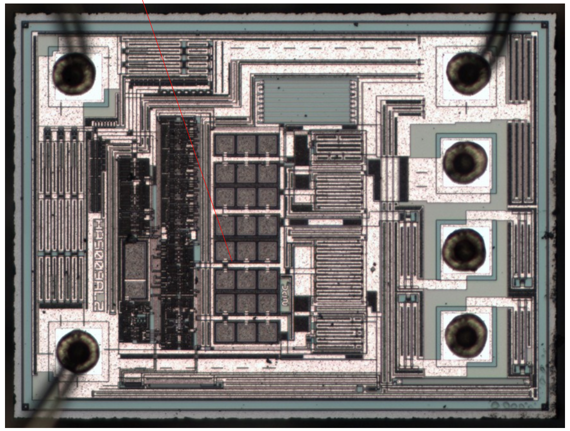
Introduction

Oscillateur 10 MHz Seiko NPC SM5009



Source: Zeptobars

Cristal de quartz
(piézoéletrique)

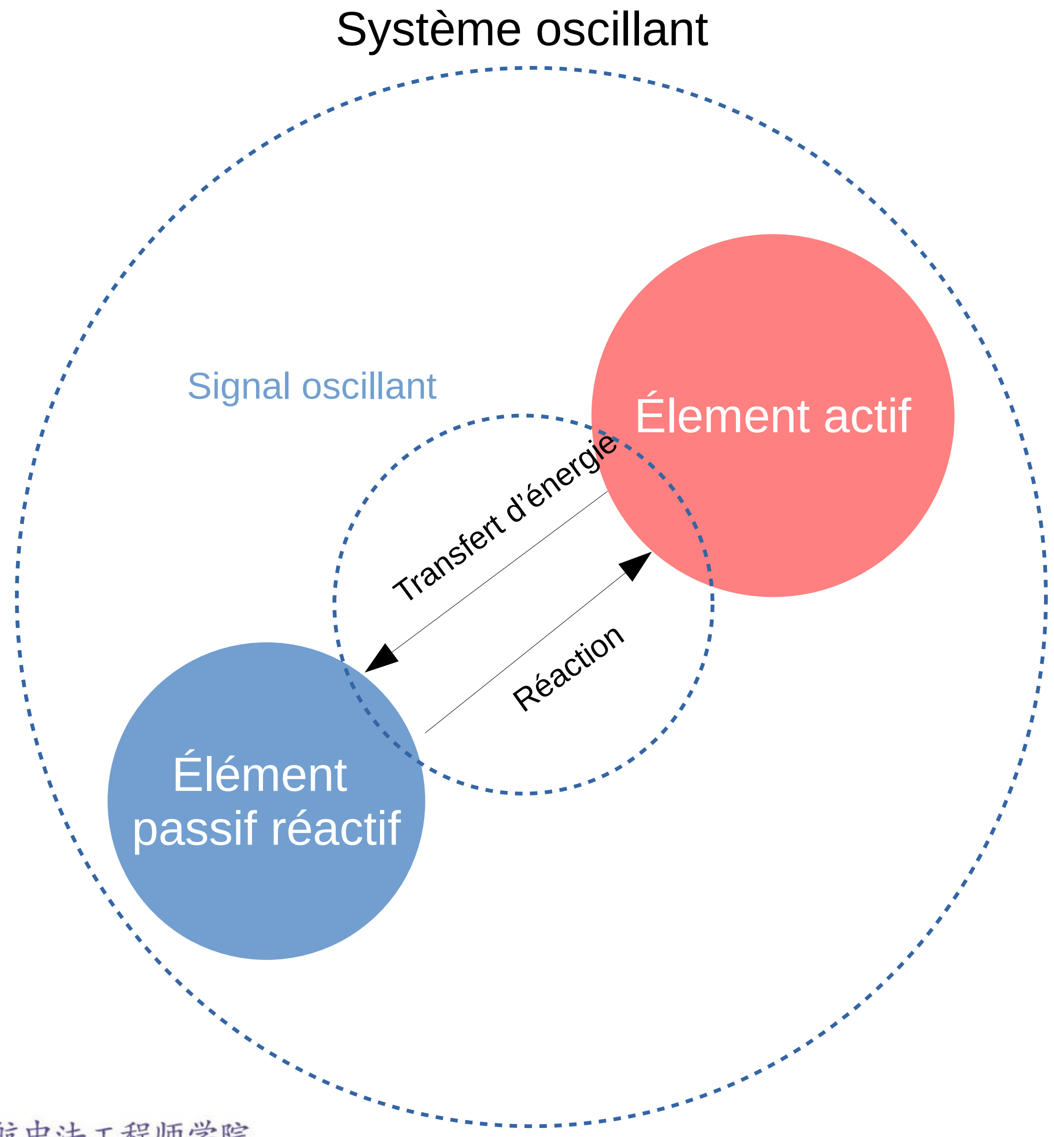


Circuit intégré

北航中法工程师学院
Centrale Pékin

centralelille

Principe



Les oscillateurs sont basés sur une boucle de retour dans laquelle une partie du signal de sortie est réinjecté à l'entrée

- **Oscillateurs linéaires**
- **Oscillateurs à relaxation**

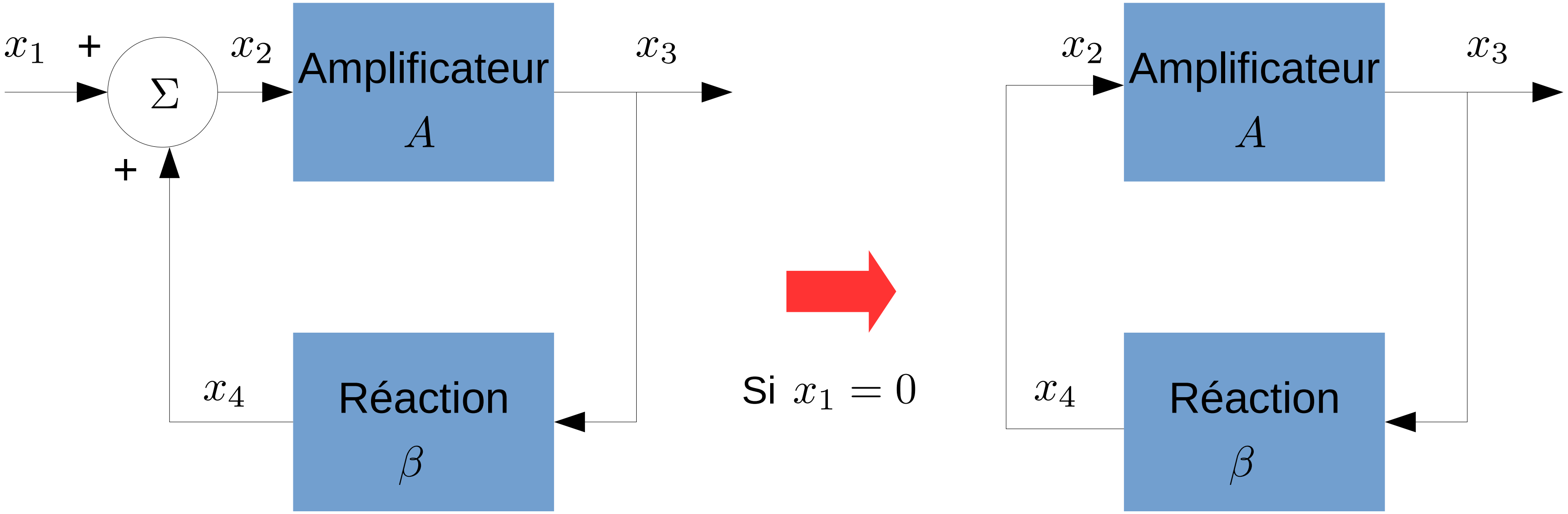
Plan du cours

1) Introduction

2) Oscillateurs sinusoïdaux

3) Oscillateurs à relaxation

Principe de fonctionnement



Pour que l'oscillateur puisse fonctionner par lui-même, il faut que $x_1 = 0$.

→ La contre-réaction doit être positive

Si on suppose que A = constante/fréquence :

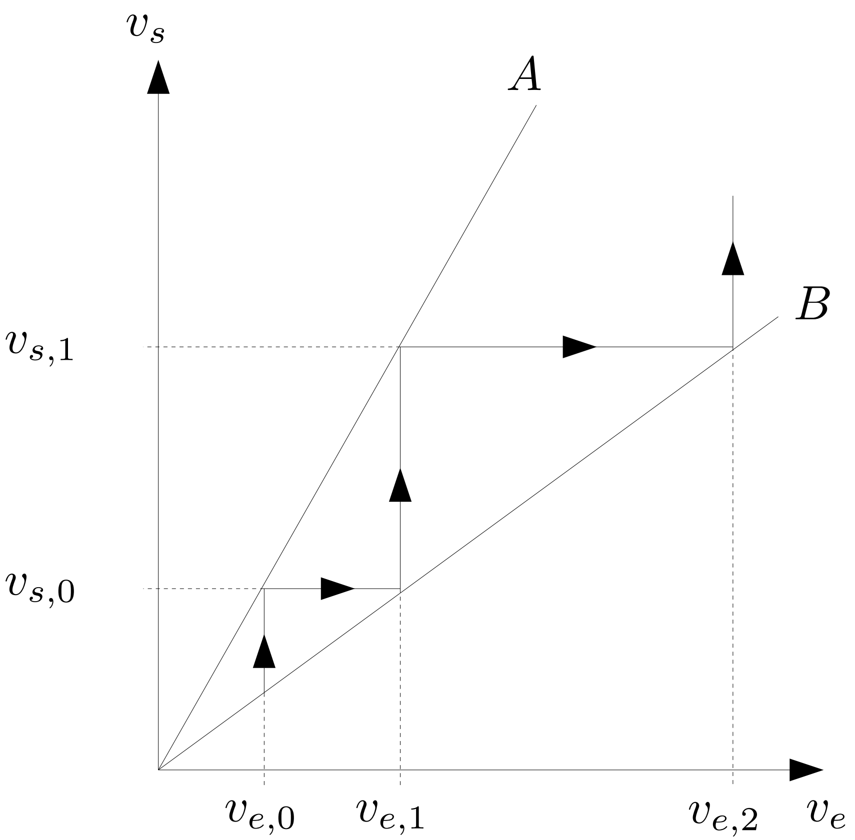
$$H(j\omega) = \frac{x_3}{x_1} = \frac{A}{1 - A\beta(j\omega)}$$

北航中法工程师学院 Centrale Pékin

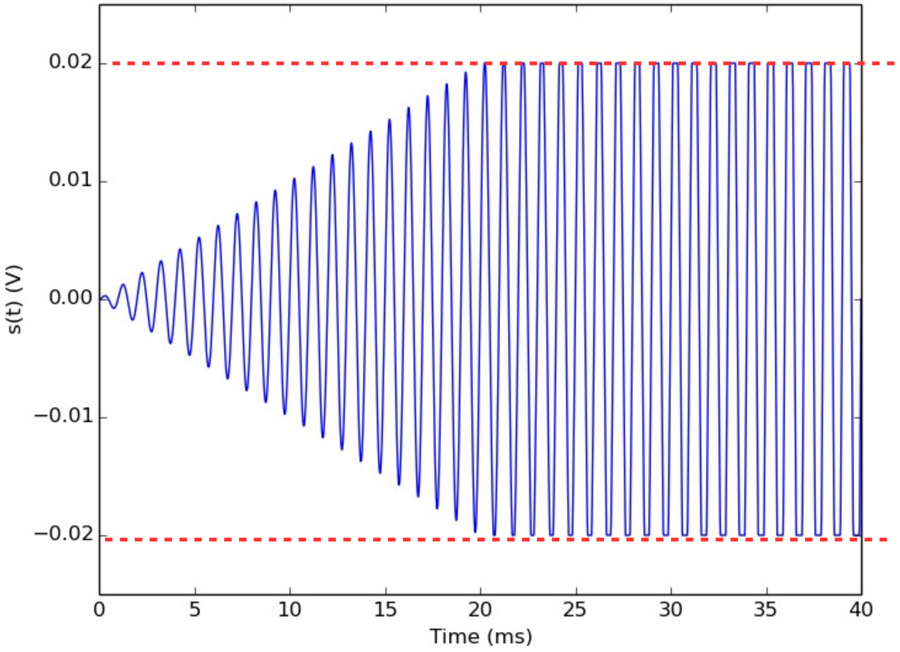
centralelille

Régimes de fonctionnement

1 Si **Aβ(jω) > 1** : L'amplitude du signal de sortie $X_3(t)$ augmente alors très rapidement jusqu'à entraîner la saturation de l'amplificateur. C'est cette propriété qui est utilisée dans les **générateurs de signaux carrés** ou les bascules astables.

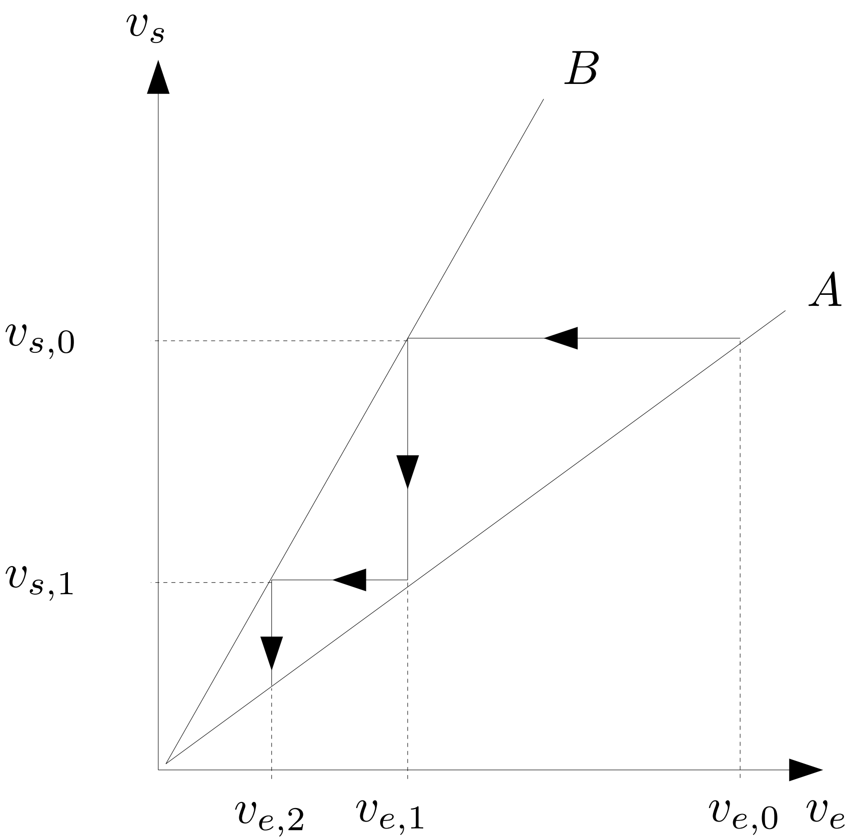


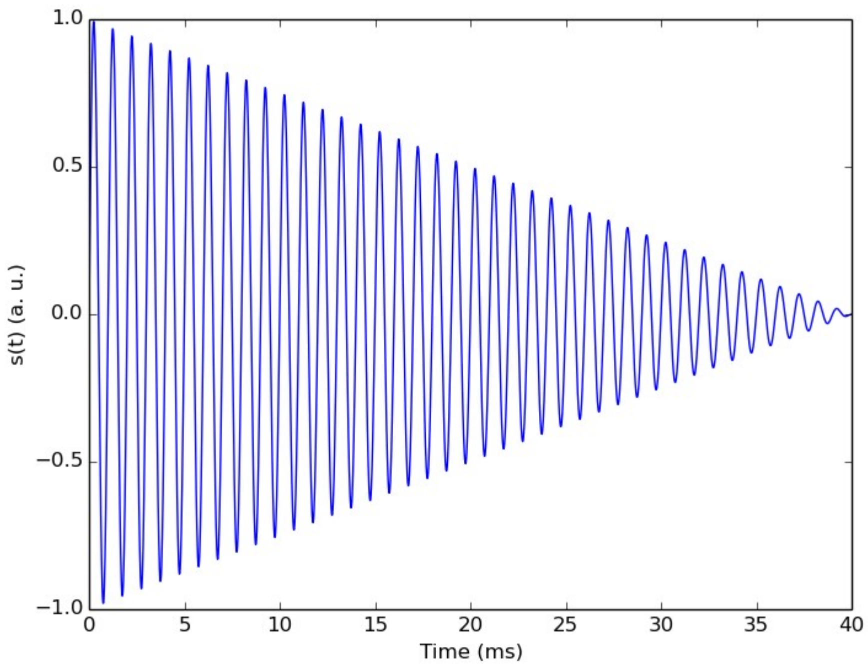
Saturation



Régimes de fonctionnement

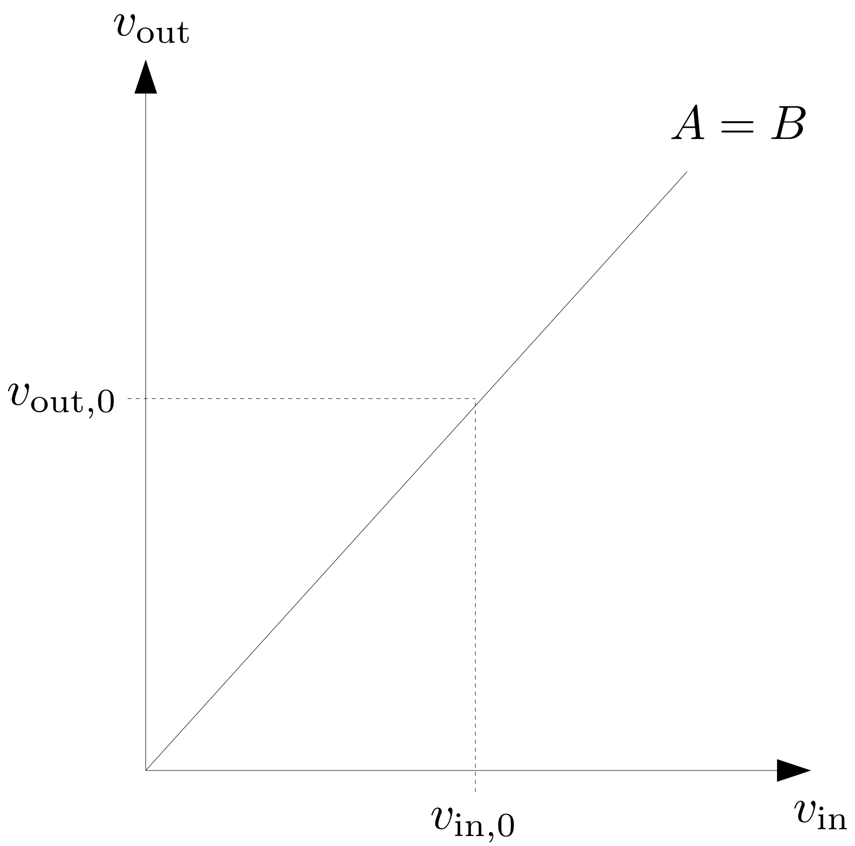
2 Si **Aβ(jω) < 1** : L'amplitude du signal de sortie $X_3(t)$ aura tendance à diminuer en tendant vers zéro. Cela correspond au régime transitoire des **amplificateurs linéaires**.

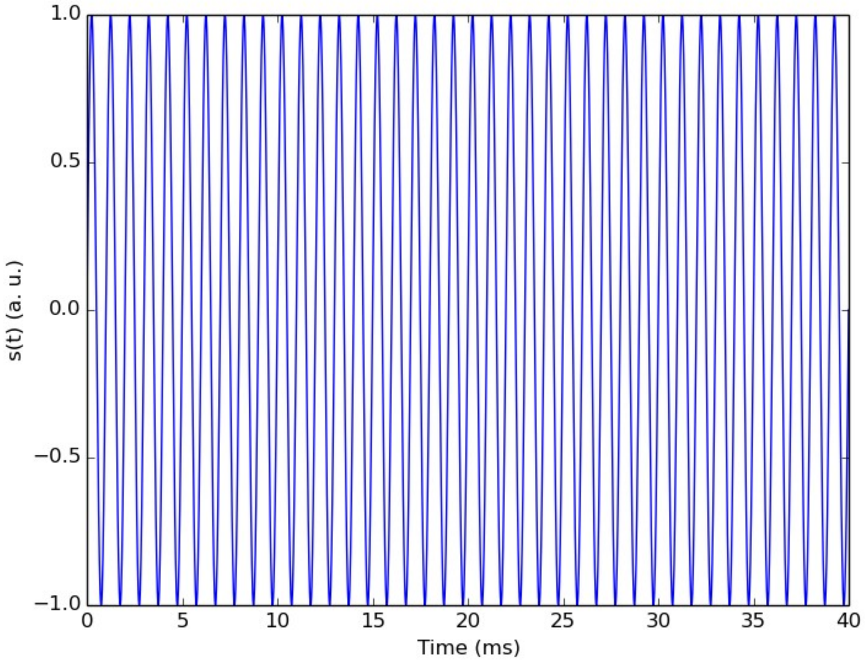




Régimes de fonctionnement

3 Si **Aβ(jω) = 1**, la valeur de $X_4(t)$ est identique à celle de $X_2(t)$ et il n'y a plus besoin de signal d'entrée : le circuit s'auto-entretient. C'est cette propriété qui est utilisée pour créer des **oscillateurs sinusoïdaux** (linéaires).





Conditions d'oscillation

La condition pour obtenir des oscillations permanentes s'écrit :

$$1 - A\beta(j\omega) = 0 \Leftrightarrow A\beta(j\omega) = 1$$

$$|A\beta(j\omega)| = 1 \qquad \varphi(A\beta(j\omega)) = n2\pi, n \in \mathbb{N}$$

1 La fréquence d'oscillation f_0 est celle pour laquelle le déphasage de boucle est un multiple entier de π :

$$\beta(j\omega_0) \in \mathbb{R} \Leftrightarrow \varphi(\beta(j\omega_0)) = n\pi, n \in \mathbb{N}$$

La fréquence d'oscillation est fixée par la boucle de retour.

2 Les oscillations ne peuvent être entretenues à f_0 que si :

$$A = \frac{1}{|\beta(j\omega_0)|}$$

L'entretien de l'amplitude est détreminée par le gain de l'amplificateur.

Conditions d'oscillation

Il faut donc que :

- Le circuit de réaction $\beta(j\omega)$ ait : Amplitude et Phase = fonction (ω)
  - La phase du circuit passe par : 0 ou +/- π

→ Filtres passe-bas ou passe-haut d'ordre 3 ou filtre passe-bande.

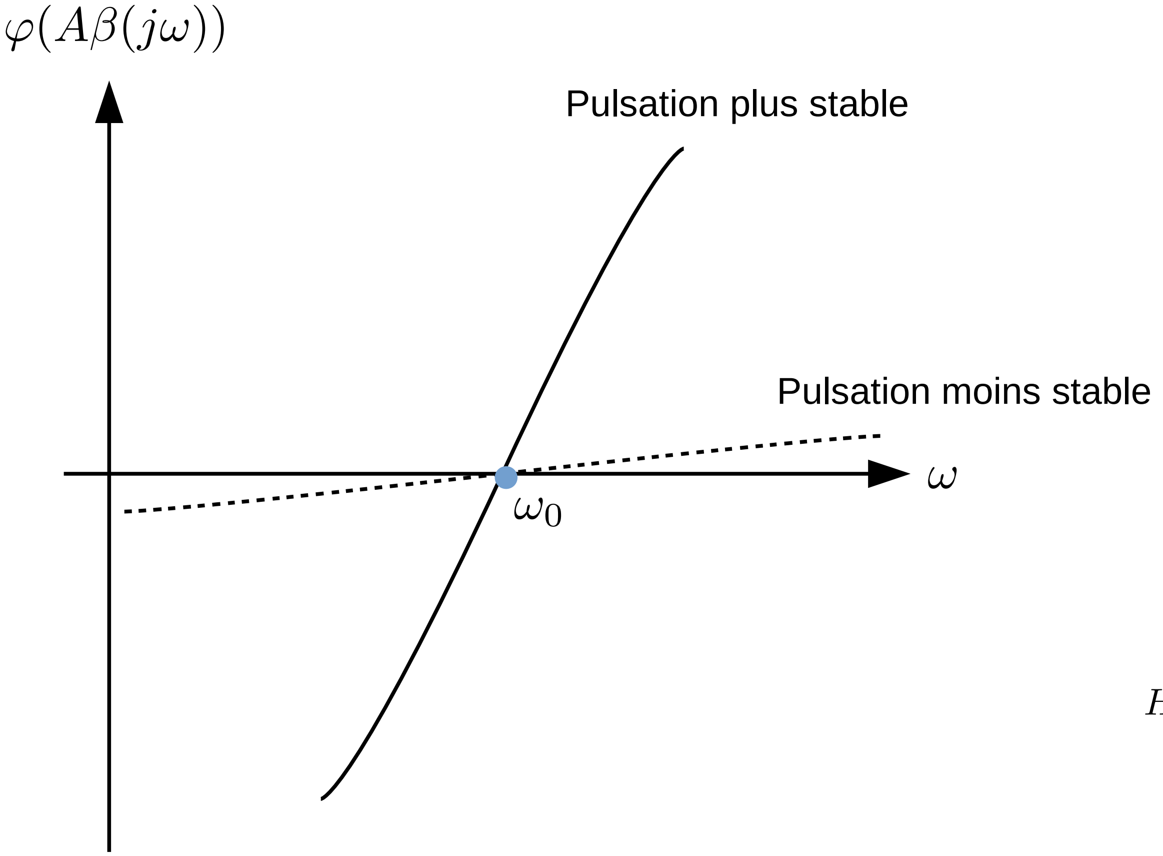
Le choix dépend de:

1) La sensibilité de ω à la phase du filtre

2) De la facilité de réalisation

Stabilité de fréquence

Le choix d'un circuit d'oscillateur plutôt que d'un autre se fera sur la base d'un compromis entre le coût de réalisation et la stabilité de la fréquence d'oscillation.



La **stabilité** est définie par :

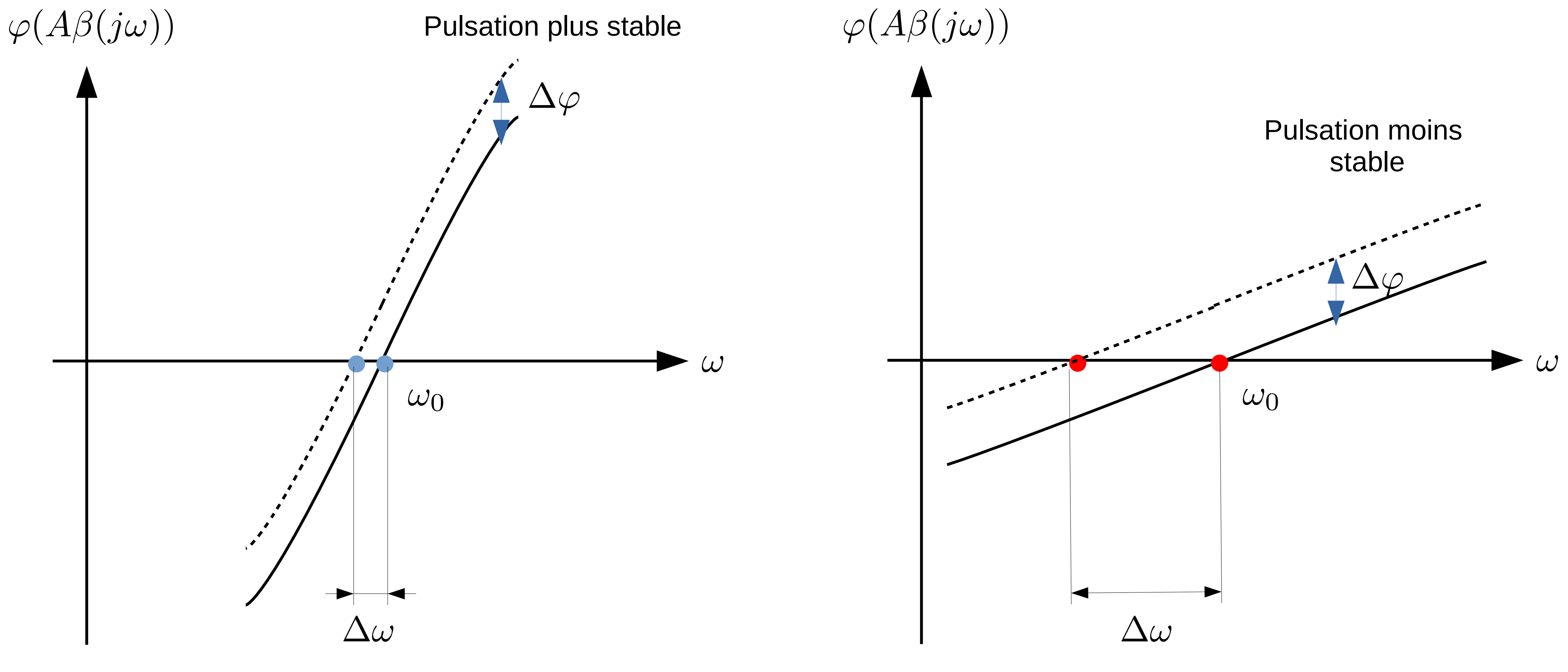
$$S(\omega_0) = \left| \frac{d\varphi(\beta(j\omega))}{d(\omega/\omega_0)} \right|_{\omega=\omega_0}$$

Lorsque la rétro-action $\beta(j\omega)$ est réalisée avec un filtre passe-bande la stabilité est alors :

$$H_{BP2}(s) = K\frac{s\frac{\omega_0}{Q}}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$

$$S(\omega_0) = 2Q$$

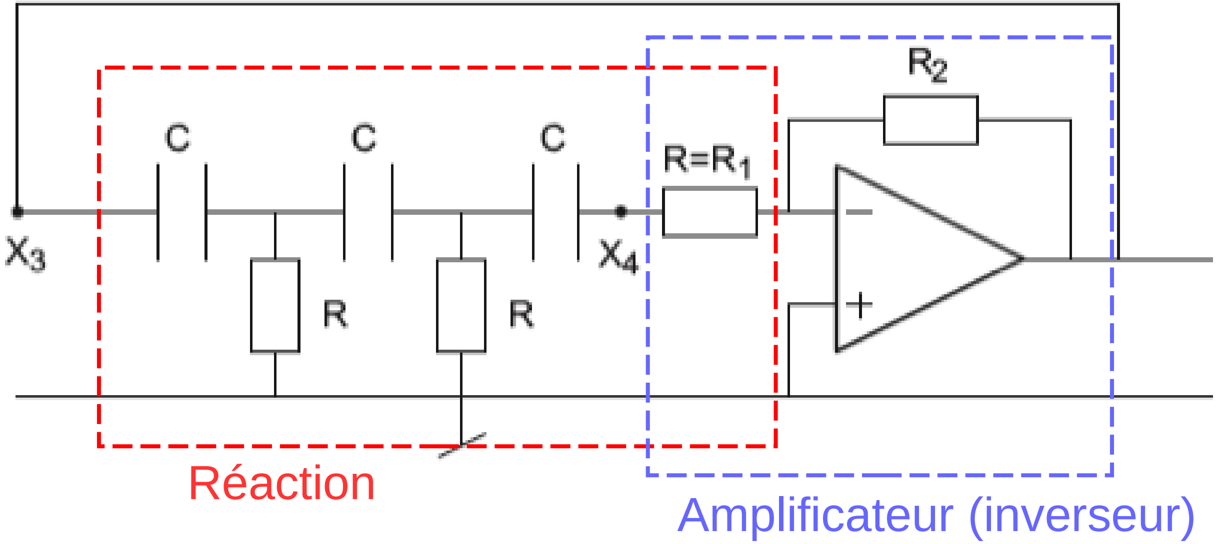
Stabilité de fréquence



Oscillateur à déphaseur CR

Il est constitué :

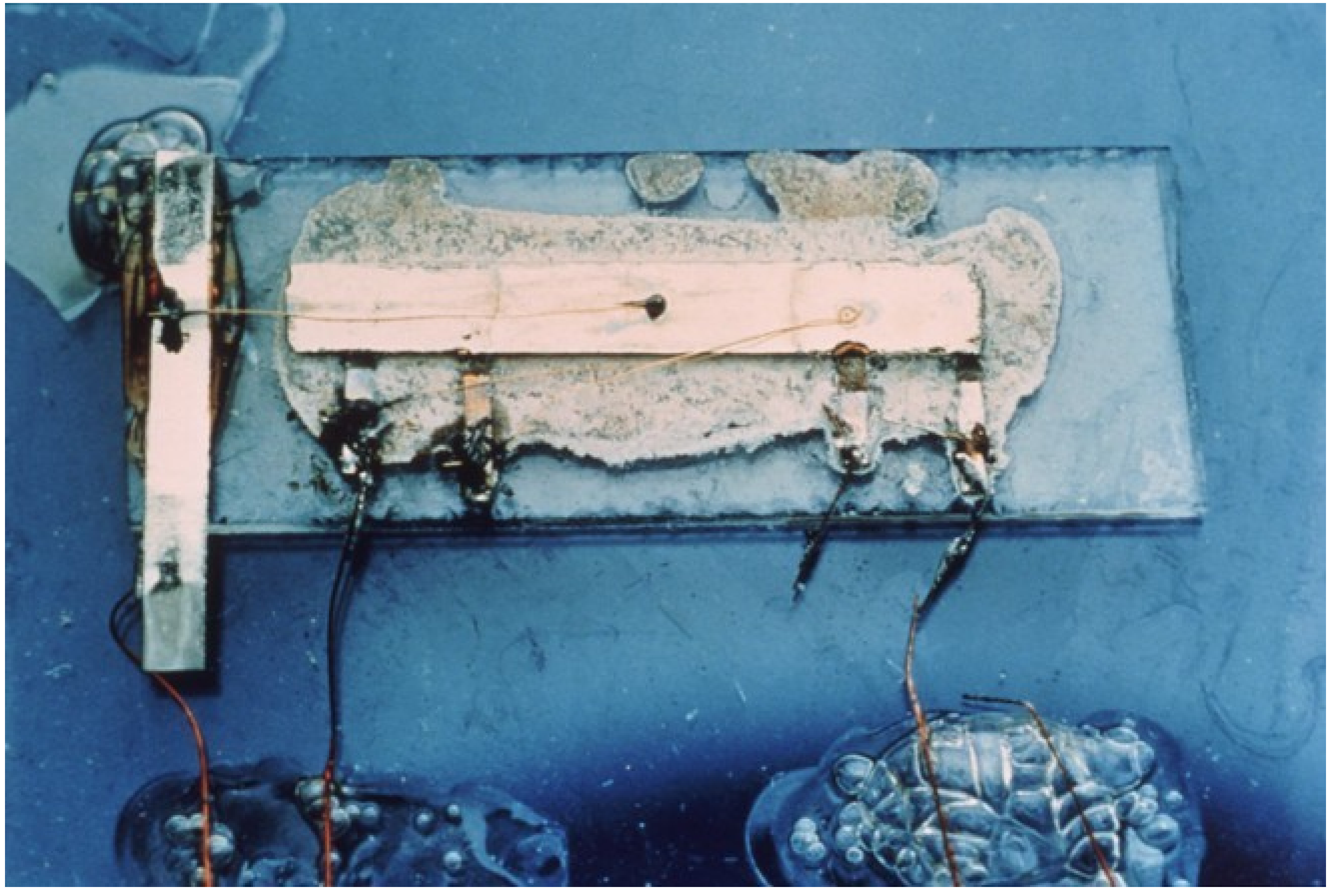
- D'un amplificateur inverseur
- D'un circuit de réaction comportant 3 cellules CR (passe-haut d'ordre 3)



$$\beta(j\omega) = \frac{1}{1 - \frac{5}{(\omega RC)^2} - j\left(\frac{6}{\omega RC} - \frac{1}{(\omega RC)^3}\right)}$$

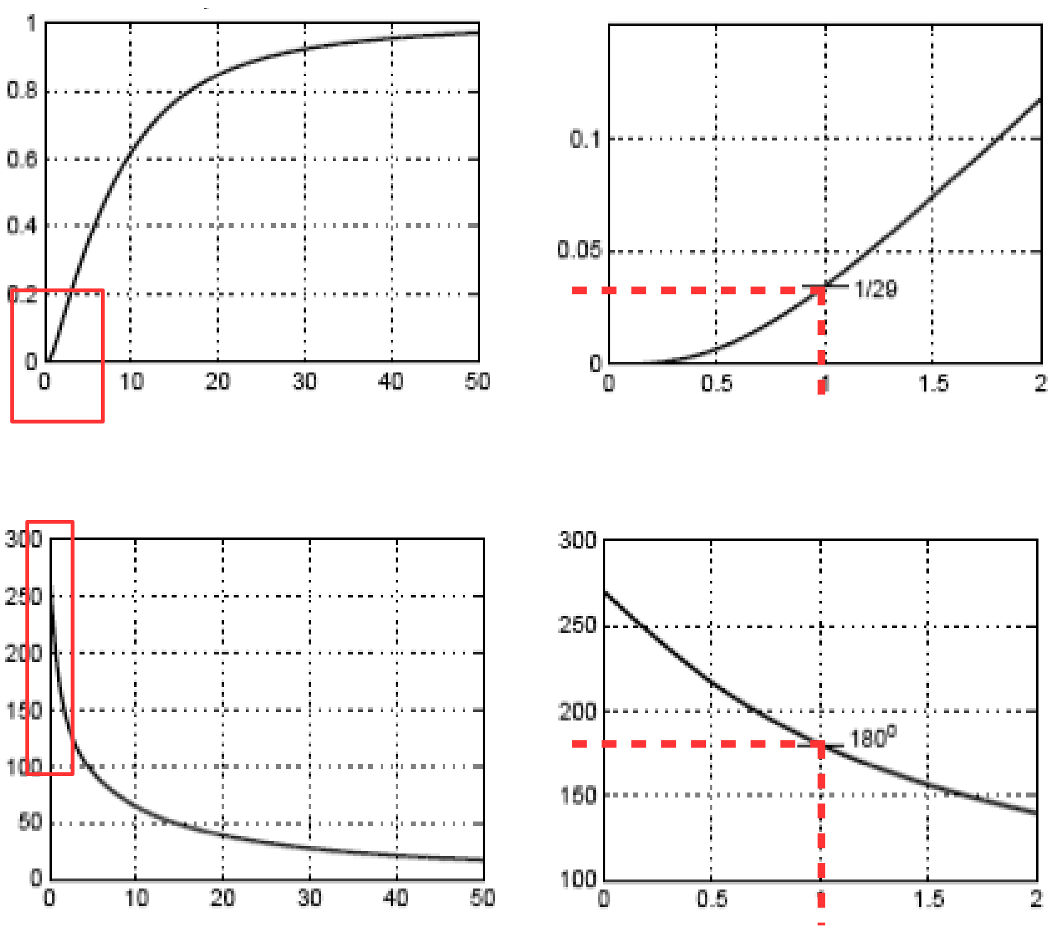
Oscillateur à déphaseur CR

Jack Kilby en 1958



Premier circuit intégré de l'histoire !

Oscillateur à déphaseur CR



Fréquence d'oscillation

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$$

Stabilité en fréquence

$$S(\omega_0) = \frac{12}{29}\sqrt{6} \approx 1,01$$

Pour maintenir les oscillations, il faut:

$$A = -\frac{R_2}{R_1} = -29$$

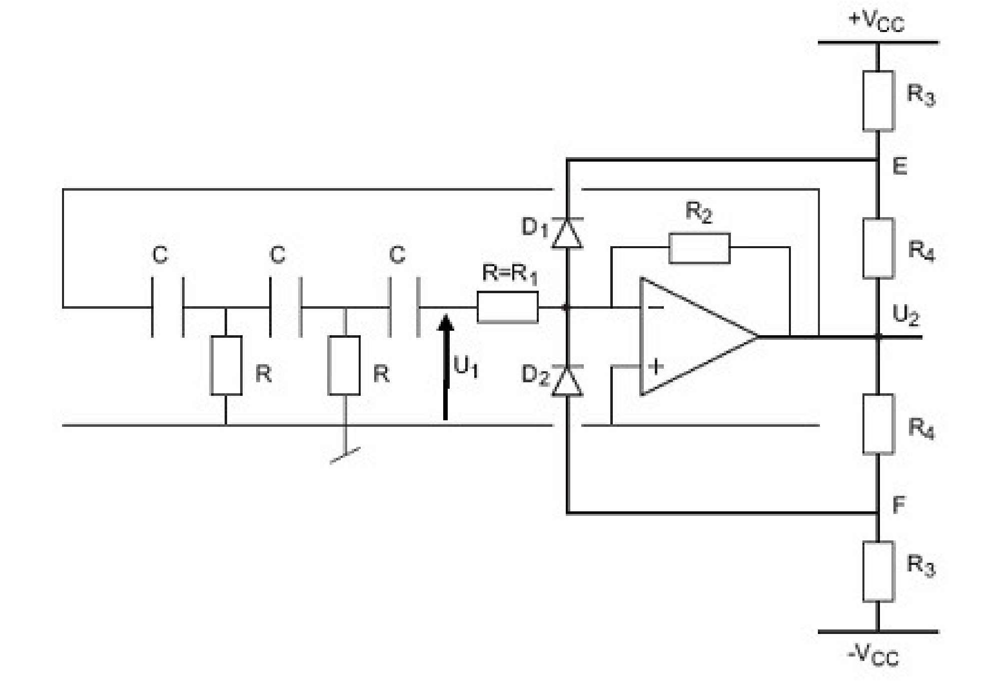
@ ω=ω_0, $\varphi(\beta(j\omega)) = \pi \quad |\beta(j\omega)| = \frac{1}{29}$

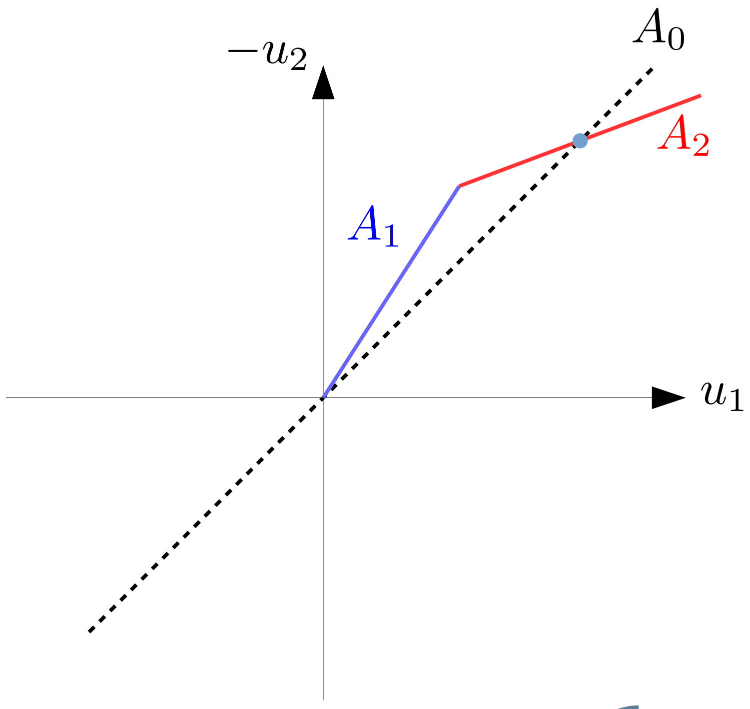
Contrôle d’amplitude

Problème : La condition d’oscillation est difficile à obtenir ! $|A\beta(j\omega)| = 1$

Solution : Un gain non-linéaire !

→ Gain plus élevé pour les faibles tensions d’entrée
→ Gain plus faible pour las hautes tensions d’entrée





Contrôle d’amplitude

Exemple : Résistance à coefficient de température négatif (CTN)

V_s augmente

⬇

I_{CTN} augmente

⬇

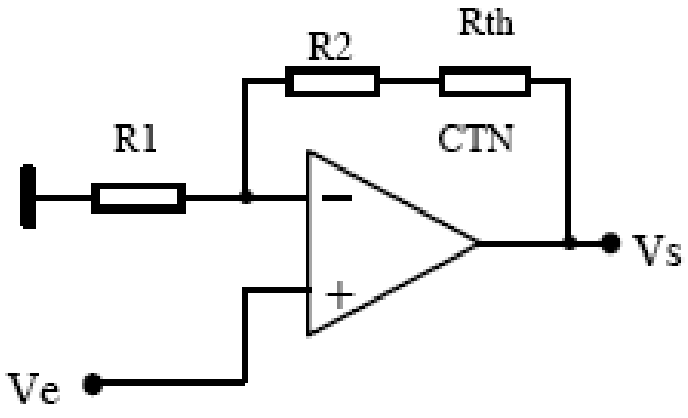
T_{CTN} augmente

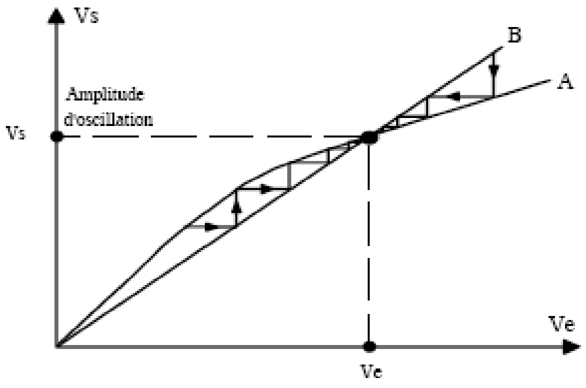
⬇

R_{th} décroît

⬇

$$G = 1 + \frac{R_2 + R_{th}}{R_1}$$ décroît





Contrôle d’amplitude

Si A_1 et A_2 sont très différents de A_0

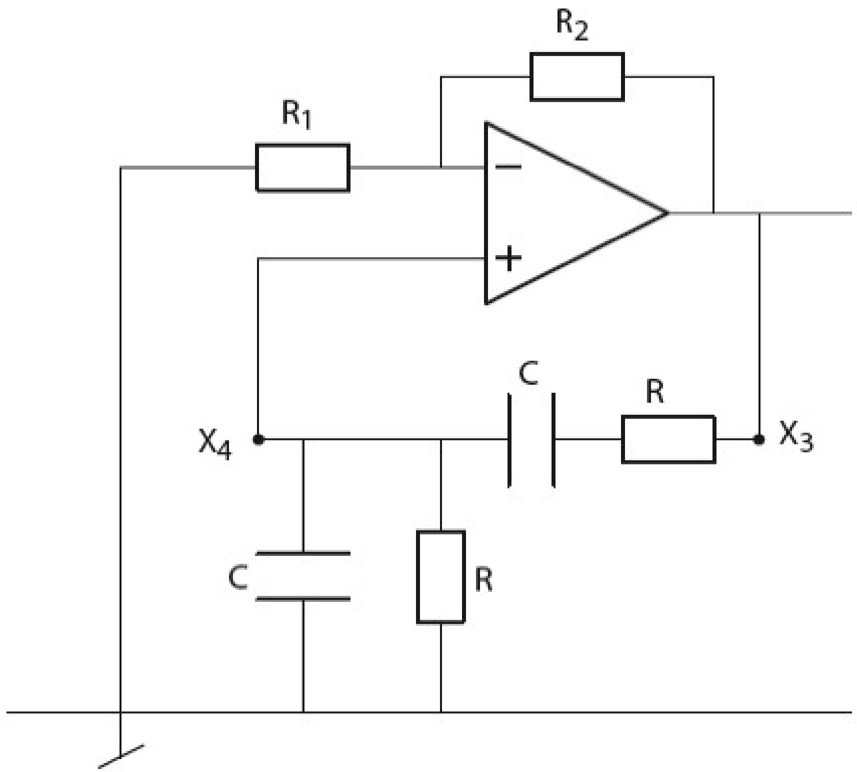
→ Bon contrôle d’amplitude
→ Fortes distorsions du signal

Si A_1 et A_2 sont très proches de A_0

→ Moins de distorsions
→ Contrôle d’amplitude difficile

Oscillateur de Wien

Amplificateur non inverseur + Filtre passe-bande



Gain en boucle ouverte

$$A\beta(j\omega) = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{1}{3 + j(\omega RC - 1/(\omega RC))}$$

Fréquence d'oscillation

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

Condition d'oscillation

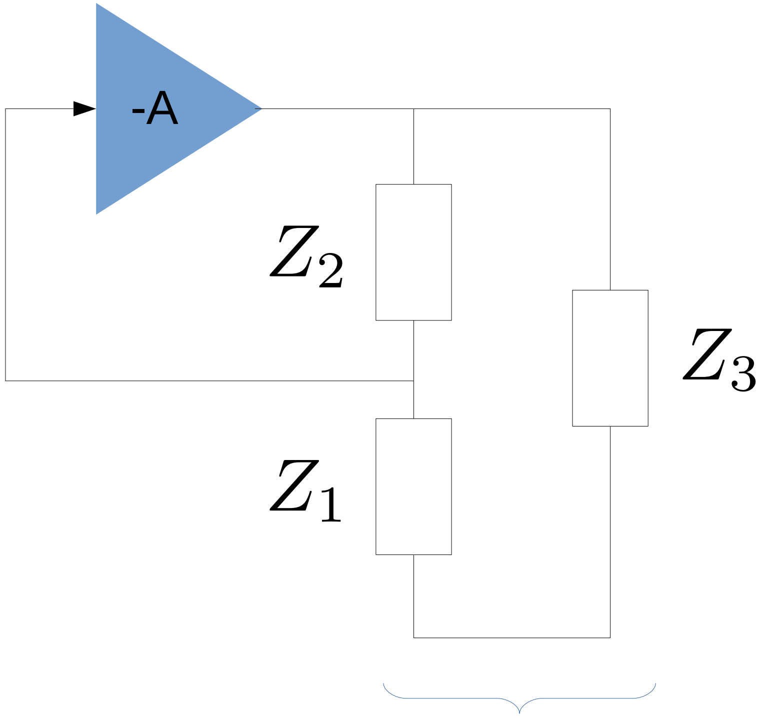
$$A(j\omega) = A_0 = \frac{1}{\beta(j\omega_0)} = 3 = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Stabilité en fréquence

$$S(\omega_0) = \left| \frac{d\varphi(\beta(j\omega))}{d(\omega/\omega_0)} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{2}{3} \approx 0.667$$

Oscillateurs hautes fréquences

Les oscillateurs RC ne permettent pas d’obtenir des fréquences d’oscillations élevées.
On utilise des oscillateurs LC ou accordés (ex : en AM et FM)

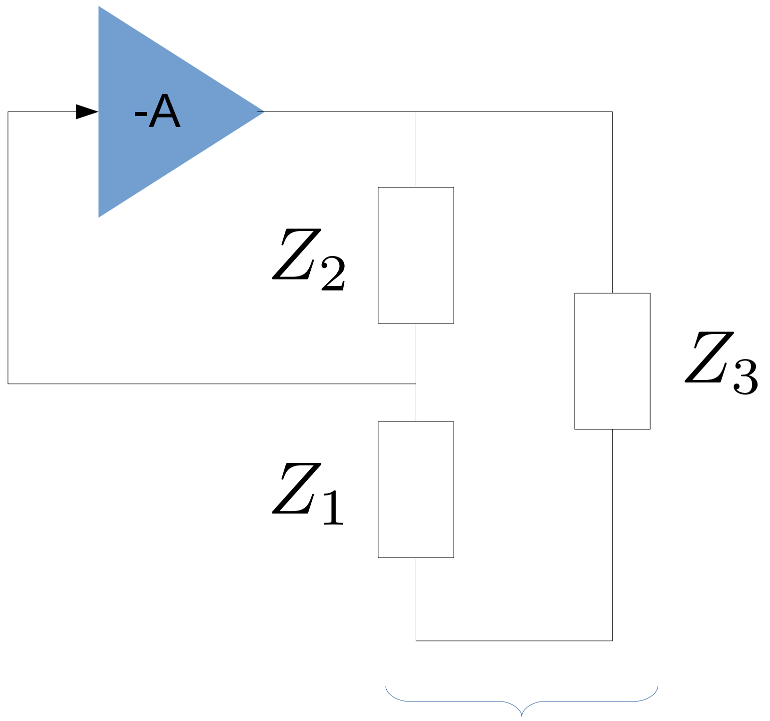


Circuit accordé

Principe de fonctionnement :

Une fraction de la tension aux bornes du circuit accordé est réinjectée à l'entrée d'un amplificateur inverseur constituant la chaîne directe.

Oscillateurs hautes fréquences



Circuit accordé

Les calculs montrent que pour qu'il y ait oscillation, il faut que les réactances Z1 et Z3 soient du même type.

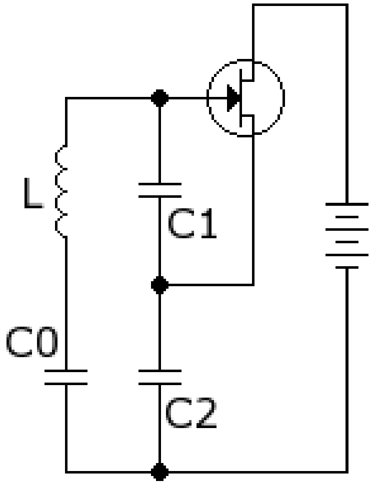
Si Z_1 et Z_3 sont des capacités et Z_2 une inductance :

Oscillateurs Colpitts, Clapp

Si Z_1 et Z_3 sont des inductances et Z_2 une capacité :

Oscillateurs Hartley

Oscillateur Clapp



Fréquence d'oscillation

$$\omega_{\text{osc}} = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_{\text{eq}}}} \quad \text{avec} \quad \frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_0}$$

Stabilité en fréquence

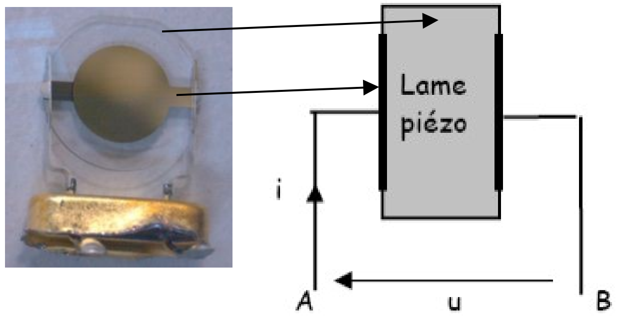
Si le facteur de qualité du filtre de boucle est grand :

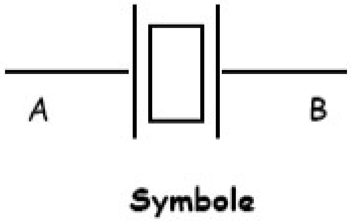
$$\left|\frac{d\varphi}{df}\right|_{f_{\text{osc}}} \approx \frac{2Q}{f_{\text{osc}}}$$

Si on veut augmenter la stabilité, il faut augmenter Q !

Oscillateur à quartz

VCTCXO — voltage controlled temperature compensated crystal oscillator (Ex. : TC7050 AEC)





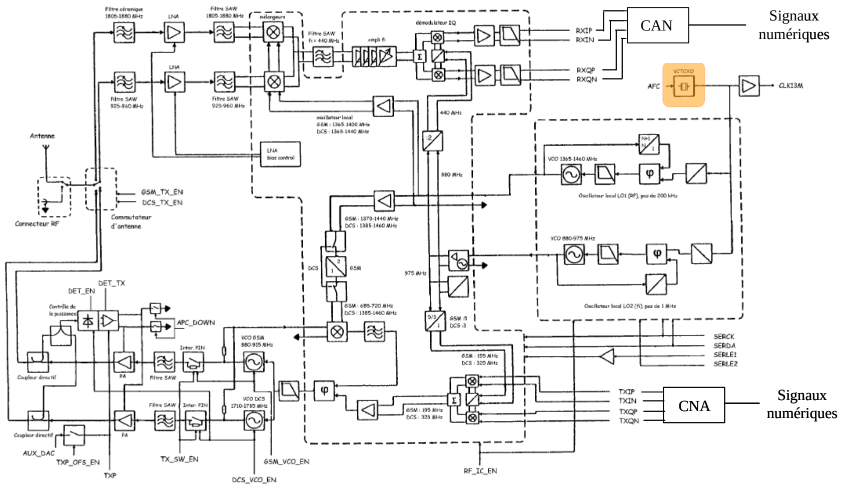
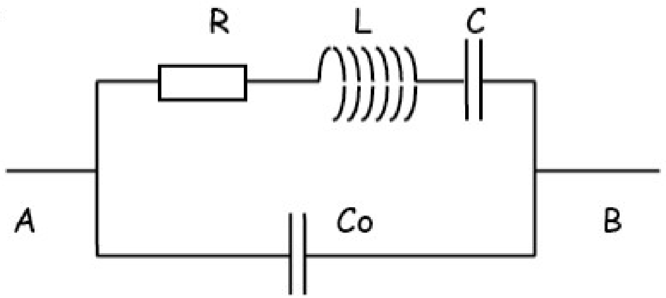


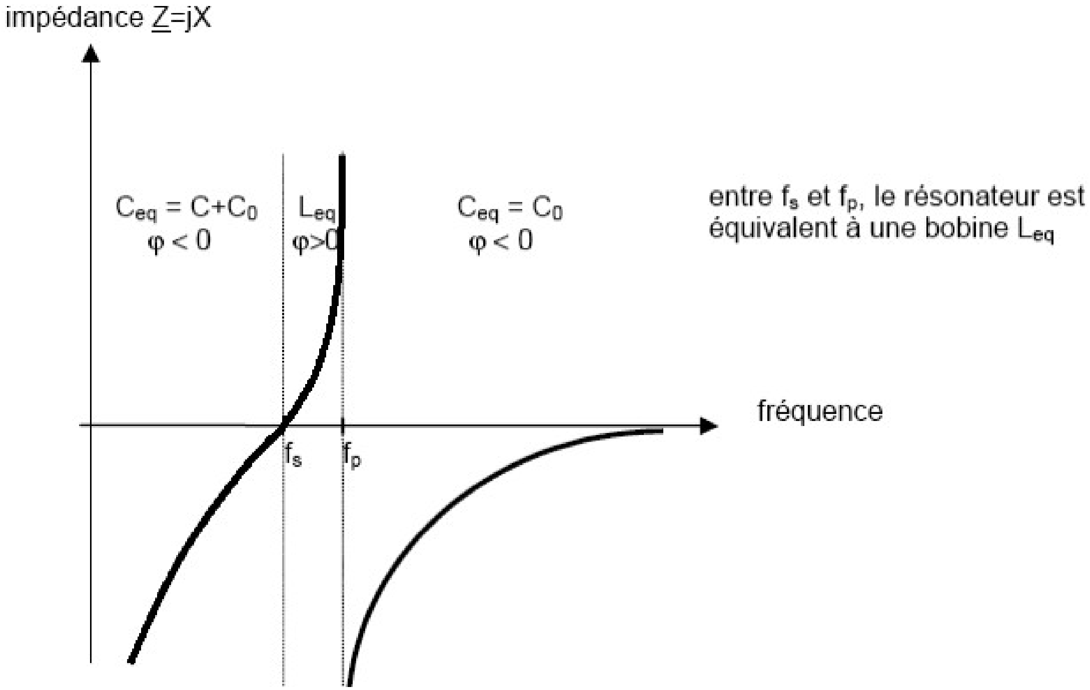
Schéma équivalent

C_o : capacité entre les électrodes (de 10 pF à 200 pF)
R : traduit l'existence des pertes dans le cristal (quelques Ω à quelques kΩ)
L : traduit l'existence de l'inertie mécanique (quelques mH à quelques H)
C : traduit l'existence des forces de rappel (quelques centièmes de pF !)



Oscillateur à quartz

Impédance du quartz : $Z = \frac{1}{j(C+C_0)\omega} \frac{1-\frac{\omega^2}{\omega_s^2}}{1-\frac{\omega^2}{\omega_p^2}}$ avec $\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (série) et $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L\frac{CC_0}{C+C_0}}}$ (parallèle)



Application numérique :

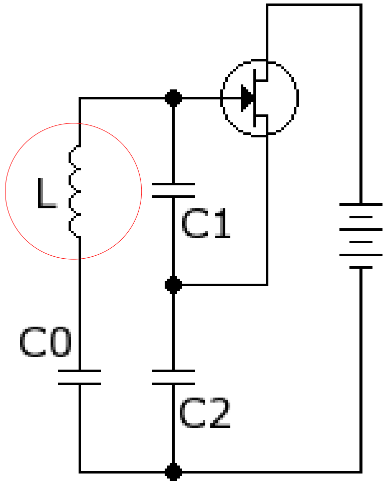
L = 3.486 mH, C = 10 fF, et C_0 = 3 pF

f_s = 26 956 061.61 Hz,

f_p = 27 000 951.00 Hz pour $R \approx 0$ (30 Ω)

Oscillateur à quartz

Le quartz remplace l'inductance L



Facteur de qualité du quartz :
Entre 10^4 et 10^6, maximum environ $Q = 1.6 \times 10^7/f$, avec f la fréquence de résonance en MHz.

Exemple numérique :

$$\left|\frac{d\varphi}{df}\right|_{f_{\mathrm{osc}}} \approx \frac{2Q}{f_{\mathrm{osc}}} \approx 1,4.10^{-3}\ \mathrm{rad.s}^{-1}$$

Une variation de phase de un degré entraîne une variation de fréquence de seulement 12Hz.

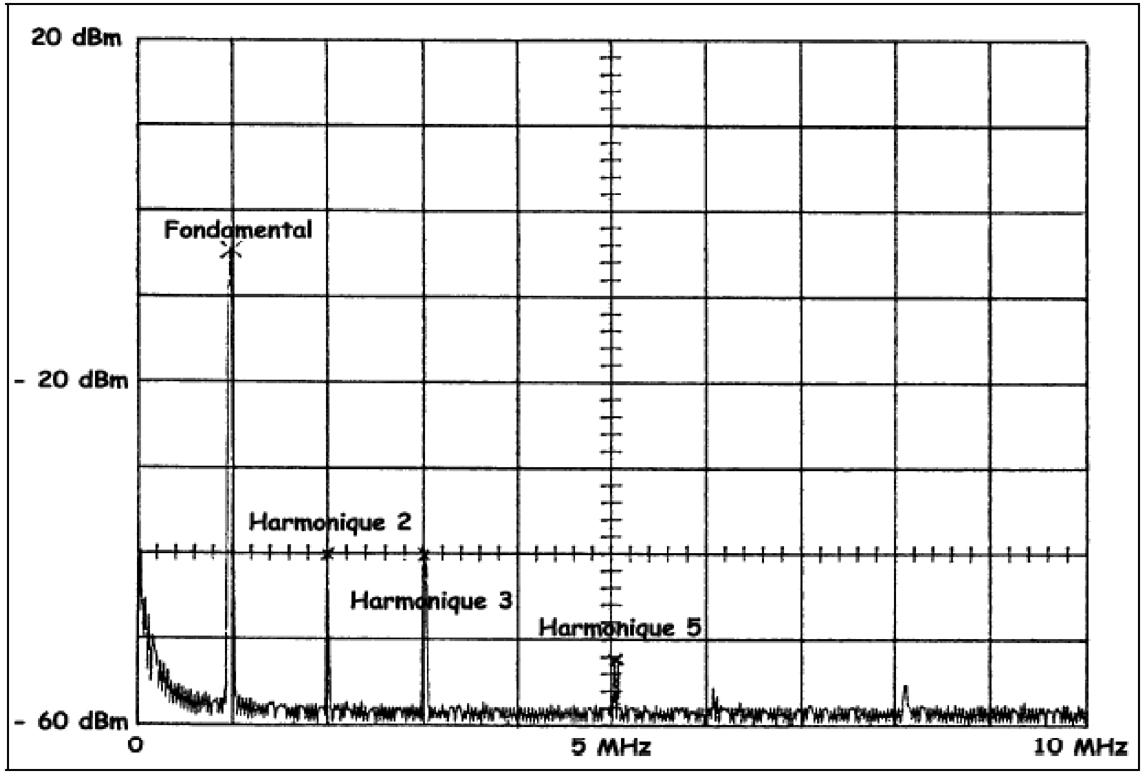
Oscillateur de grande précision : comparaison

	Oscillateurs à quartz			Horloges atomiques		
	TCXO	**MCXO**	**OCXO**	**Rubidium**	**RbXO**	**Cesium**
Précision* (par an)	2×10^{-6}	6×10^{-8}	1×10^{-8}	5×10^{-10}	7×10^{-10}	2×10^{-11}
Dérive/an	5×10^{-7}	2×10^{-8}	5×10^{-9}	2×10^{-10}	2×10^{-10}	0
Stabilité en température. (variation, °C)	5×10^{-7} (-55 to +85)	3×10^{-8} (-55 to +85)	1×10^{-9} (-55 to +85)	3×10^{10} (-55 to +68)	5×10^{10} (-55 to +85)	2×10^{11} (-28 to +65)
Stabilité, $s_y(t)$ (t=1s)	1×10^{-9}	3×10^{-10}	1×10^{-12}	3×10^{-12}	5×10^{-12}	5×10^{-11}
Taille (cm^2)	10	50	20-200	800	1200	6000
Temps de démarrage (min.)	0.1 (to 1×10^{-6})	0.1 (to 2×10^{-8})	4 (to 1×10^{-8})	3 (to 5×10^{-10})	3 (to 5×10^{-10})	20 (to 2×10^{-11})
Puissance (W) (à la plus basse temp.)	0.05	0.04	0.6	20	0.65	30
Prix (~$)	100	1,000	2,000	8,000	10,000	40,000

Source: http://www.icmfg.com/quartzoscillatorchar.html

Métrologie des oscillateurs

Taux de distorsion :
La qualité d'un oscillateur sinusoïdal est d'abord évaluée par analyse spectrale du signal à sa sortie et calcul du taux de distorsion.



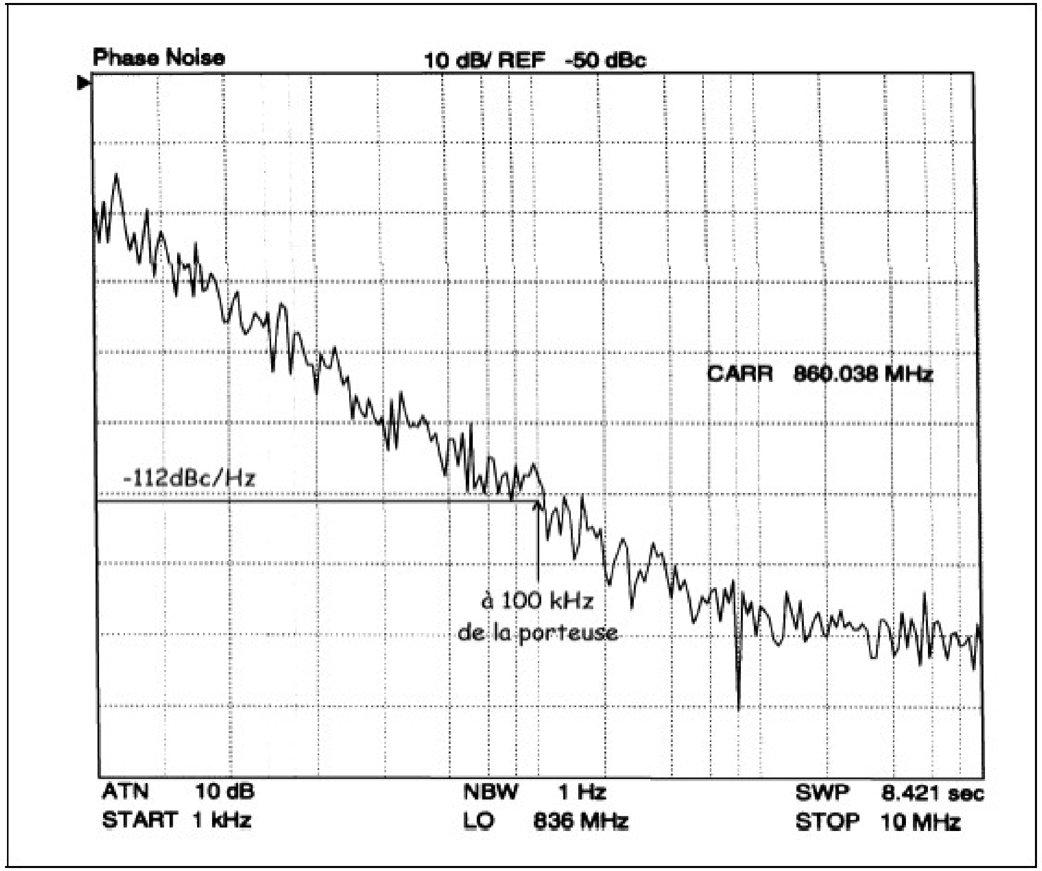
F = -5 dBm = 126 mV
H_2 = -40 dBm = 2,2 mV
H_3 = -40 dBm = 2,2 mV
H_5 = -52 dBm = 0,6 mV

Le taux de distorsion s'écrit :

$$t_d = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots}}{F} = 2,5\%$$

Métrologie des oscillateurs

Bruit de phase :
Le bruit de phase est affiché directement sur un analyseur équipé de cette option et sera exprimé en dBc/Hz (niveau par rapport au niveau de la raie du signal dans une bande de largeur 1 Hz).



Un bon oscillateur est caractérisé par un bruit de phase à une distance donnée de la porteuse le plus faible possible .

Ordre de grandeur :
TC7050
-125dBc/Hz à 1kHz.

Plan du cours

1) Introduction

2) Oscillateurs sinusoïdaux

3) Oscillateurs à relaxation

Oscillateurs à relaxation

Principe :

- L'amplificateur opérationnel peut être utilisé pour générer des signaux **rectangulaires** ou sinusoïdaux.
- Pour la réalisation de signaux rectangulaires on utilise les propriétés des amplificateurs opérationnels **en commutation**.
- On peut aussi utiliser des circuit spécialisé comme le Timer 555.

Suite dans le polycopié de cours.

centralelille

AUDACE • EXIGENCE • RESPECT