

OSCILLATEURS QUASI-SINUSOÏDAUX

MATERIEL MIS A DISPOSITION :

- ✓ 1 Oscilloscope numérique
- ✓ 1 GBF
- ✓ 1 alimentation +15V/-15V
- ✓ 1 plaquette LAB
- ✓ Petits-fils courts
- ✓ 1 multimètre FLUKE
- ✓ 1 boîte de résistance (à décades) précision 1%
- ✓ 1 boîte de capacités (à décades)
- ✓ 1 Inductance (18 mH ou 36 mH)
- ✓ Composantes libres divers dont : diode à jonction 1N4007 ; AO TL081, résistances, capacités
- ✓ 2 câbles coaxiaux+ prise en « T »+ BNC
- ✓ 1 pont de mesures pour mesurer les résistances, inductances et capacités avec sa notice. Les notices des oscilloscopes, des GBF, des multimètres.

PREREQUIS :

- ✓ Filtre passe-bas du 2nd ordre : pulsation propre, facteur de qualité, diagramme de Bode, résonance
- ✓ Mesure de valeurs efficaces de tension à l'oscilloscope ou avec une carte d'acquisition ou avec un multimètre
- ✓ Mesure de déphasage à l'oscilloscope ou à l'aide d'une carte d'acquisition
- ✓ Comportement en fréquence des dipôles R, L et C
- ✓ Utilisation de plaquettes lab.
- ✓ Utilisation de l'ALI pour des montages linéaires ou non linéaires
- ✓ Analyse de Fourier, utilisation de la FFT sur un oscilloscope numérique
- ✓ EXAO avec carte d'acquisition et logiciel d'exploitation (ici carte SYSAM et logiciel LATTIS-PRO)

TRAVAIL DE PREPARATION

Pont de Wien :

- ✓ Lire l'énoncé du TP dans son intégralité
- ✓ Répondre aux questions de la partie II.

I. OSCILLATEURS A REACTION.

Un oscillateur en électronique est un circuit produisant une tension de sortie périodique (créniaux, dents de scie, sinusoïdale...) avec seulement une tension d'alimentation continue en entrée. Il n'y a donc pas besoin de signal périodique en entrée.

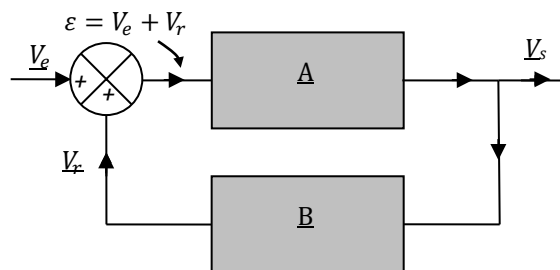
Un **oscillateur à réaction** – ou **oscillateur quasi-sinusoïdal** – est constitué des deux éléments de base suivants :

- ✓ **Amplificateur** : il fournit l'énergie nécessaire au maintien des oscillations
- ✓ **Oscillateur** : l'oscillateur sélectionne les fréquences qui seront amplifiées à partir du bruit : ce sont les fréquences de résonances de l'oscillateur.

Les oscillateurs quasi-sinusoïdaux reposent sur le principe de la rétroaction positive : La tension de sortie d'un amplificateur (A) est renvoyée vers l'entrée sans changement de phase.

1^{ère} approche : système bouclé

Soit le système bouclé suivant :



Fonction de transfert :

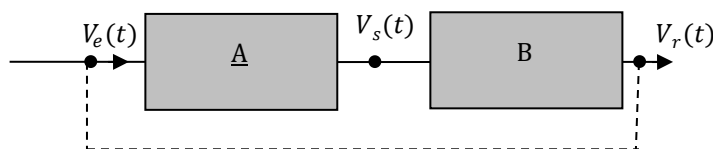
$$\underline{H} = \frac{V_s}{V_e} = \frac{A(V_e + V_r)}{V_e} = \frac{A(V_e + B V_s)}{V_e} = \underline{A} + \underline{ABH} \Rightarrow \underline{H} = \frac{\underline{A}}{1 - \underline{AB}}$$

Auto-oscillations :

- ✓ Pour que le système soit le lieu d'oscillations auto-entretenues, il faut que $V_s(t)$ soit non nulle avec $V_e(t) = 0$.
- ✓ La tension de rétroaction V_r est amplifiée pour produire la tension de sortie, qui produit à son tour la tension de rétroaction, les tensions V_r et V_s étant en phase.

2^{ème} approche : système ouvert

Soit le système « en boucle ouverte » :



Fonction de transfert :

$$\underline{T} = \frac{V_r}{V_e} = \underline{AB}$$

Auto-oscillations :

Pour que le système soit le lieu d'oscillations auto-entretenues, lorsque l'on boucle la sortie sur l'entrée (par l'intermédiaire d'un fil), il faut que $V_r(t)$ soit non nulle alors que l'entrée n'est plus alimentée.

1. RECHERCHE DE SOLUTIONS SINUSOÏDALES.

1^{ère} approche : système bouclé

Sachant que la fonction de transfert du système est : $\underline{H} = \frac{V_s}{V_e} = \frac{\underline{A}}{1-\underline{AB}}$ on en déduit que pour que le système soit le siège d'oscillations sinusoïdales, il faut que :

$$\underline{A} \times \underline{B} \Big|_{\omega=\omega_{osc}} = 1$$

2^{ème} approche : système ouvert

Sachant que la fonction de transfert du système en boucle ouverte est : $\underline{T} = \frac{V_r}{V_e} = \underline{A} \cdot \underline{B}$ et que le bouclage impose $V_r = V_e$, on en déduit que pour que le système soit le siège d'oscillations sinusoïdales, il faut que : $\underline{T} = 1$ et donc que :

$$\underline{A} \times \underline{B} \Big|_{\omega=\omega_{osc}} = 1$$

On obtient dans les deux cas le même résultat :

- Le gain en tension de la boucle doit être égal à 1 : $|\underline{A} \cdot \underline{B}| = 1$ pour $\omega = \omega_{osc}$
- Le déphasage de la boucle de rétroaction doit être nul : $\phi_A + \phi_B = 0$ pour $\omega = \omega_{osc}$

Ce dernier point est à rapprocher des conditions pour observer des interférences constructives en optique : Les signaux doivent être en phase.

Rappelons que la résolution de l'équation complexe : $\underline{AB} = 1$, nous donne deux équations réelles et donc nous permet de déterminer la pulsation des oscillations (ω_{osc}) ainsi qu'une condition reliant différents paramètres de l'oscillateur pour les oscillations démarrent (condition d'accrochage).

2. CONDITION D'ACCROCHAGE.

a. APPROCHE ITERATIVE POUR OBTENIR LA CONDITION : $|\underline{A} \cdot \underline{B}| \Big|_{\omega=\omega_{osc}} > 1$.

On se place dans le cas d'un système bouclé :

- On étudie la tension V_s obtenue en sortie à partir d'une tension d'entrée V_e et on se place dans le cas simple où A et B sont réelles.

En premier on obtient : $V_s = A \times V_e$

Puis : $V_s = A \times V_e + A^2 B \times V_e = A \times V_e (1 + AB)$

Puis : $V_s = A \times V_e + AB(A \times V_e + A^2 B \times V_e) = A \times V_e (1 + AB + (AB)^2)$

Puis : $V_s = A \times V_e + AB(A \times V_e (1 + AB + (AB)^2)) = A \times V_e (1 + AB + (AB)^2 + (AB)^3)$

⇒ On obtient ainsi une suite géométrique de raison AB .

⇒ Pour obtenir des signaux non nuls, en l'absence de générateur, il faut que cette suite diverge et donc que $AB > 1$

En généralisant ce résultat au cas où $\underline{A}$ et $\underline{B}$ sont complexes, on obtient la condition d'accrochage pour les oscillateurs quasi sinusoïdaux : $|\underline{A} \cdot \underline{B}| \Big|_{\omega=\omega_{osc}} > 1$

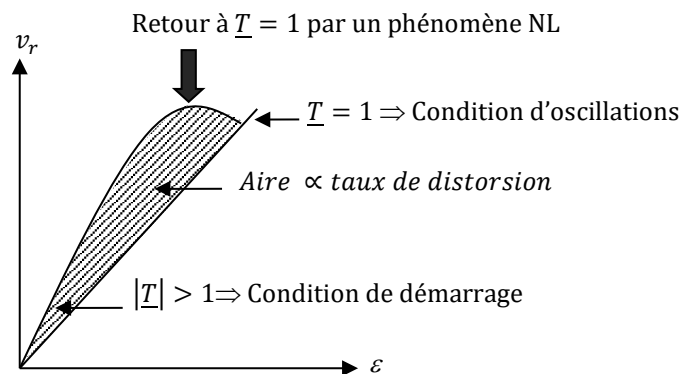
b. LIMITATION DE L'AMPLITUDE DES OSCILLATIONS : NON LINEARITES.

- On sait qu'un gain de 1 est nécessaire pour que les oscillations soient entretenues. Cependant pour que les oscillations débutent, **le gain doit être supérieur à 1 de façon à ce que la tension de sortie puisse atteindre un niveau désiré**

(oscillations croissantes). Le gain doit ensuite diminuer (oscillations décroissantes) jusqu'à 1 pour que la sortie puisse être maintenue à ce niveau et que les oscillations soient entretenues.

L'amplitude des oscillations augmente tant que le fonctionnement de l'oscillateur est linéaire : C'est l'apparition de non linéarités qui permet de revenir à $|\underline{A} \cdot \underline{B}| = 1$

- En l'absence de dispositif spécifique de stabilisation de l'amplitude des oscillations, c'est la tension de saturation des composants électroniques (ALI, puces...) qui limite l'amplitude des oscillations. Le défaut principal de ce type de montage, c'est que le signal de sortie est largement déformé par la saturation des ALI (présence de nombreuses harmoniques dans le spectre de Fourier).
- De fait, on cherchera plutôt à limiter l'amplitude des oscillations par un dispositif non linéaire dédié (diodes, CTN, transistor...) de façon à limiter la déformation du signal de sortie et se rapprocher d'un signal sinusoïdal pur.



3. APPROCHE INDICIELLE : ÉTUDE DE LA STABILITE DU SYSTEME.

- Considérons le cas d'un oscillateur tel que la fonction de transfert de l'amplificateur est réelle :

$$\underline{A} = A = \text{cste}$$

et tel que la fonction de transfert du résonateur est un filtre passe-bande du second ordre de la forme :

$$\underline{B} = \frac{j \frac{\omega}{\omega_0}}{1 + \frac{1}{Q} j \frac{\omega}{\omega_0} + \left(j \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

On a donc :

$$\underline{T} = \frac{V_r}{V_e} = \underline{A} \cdot \underline{B} = A \frac{j \frac{\omega}{\omega_0}}{1 + \frac{1}{Q} j \frac{\omega}{\omega_0} + \left(j \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

- L'étude indicielle du système donne alors l'équation différentielle vérifiée par $V_r(t)$:

$$\frac{d^2 V_r}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dV_r}{dt} + \omega_0^2 V_r = A \omega_0 \frac{dV_e}{dt}$$

- Lorsque le système est bouclé, on obtient donc :

$$\frac{d^2 V_r}{dt^2} - \left(A - \frac{1}{Q}\right) \omega_0 \frac{dV_r}{dt} + \omega_0^2 V_r = 0$$

Ainsi, pour avoir des oscillations sinusoïdales, il faut que $A = \frac{1}{Q}$. Autrement dit, Il faut que l'énergie dissipée à chaque cycle dans l'oscillateur (ou résonateur) soit compensée par l'énergie apportée par l'amplificateur.

Notons que pour le démarrage des oscillations, il faut que $A > \frac{1}{Q}$

- On peut généraliser ce résultat de la manière suivante :

Un oscillateur à réaction délivre un signal non nul si l'énergie dissipée dans le résonateur pendant une période est compensée par l'énergie apportée par l'amplificateur pendant cette même période.

4. APPROCHE SPECTRALE, NOTION DE RESONATEUR ET D'EXCITEUR.

a. CAS PARTICULIER.

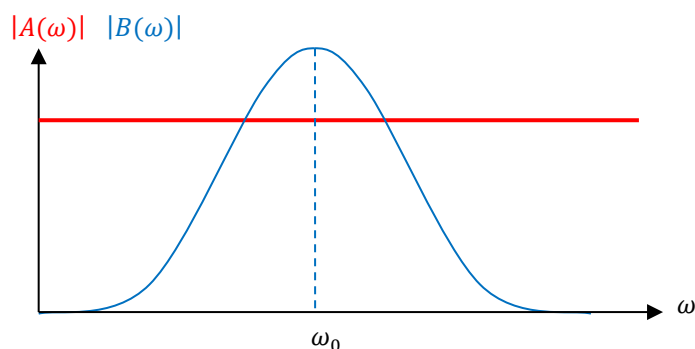
- Considérons le cas d'un oscillateur tel que la fonction de transfert de l'amplificateur est réelle :

$$\underline{A} = A = cste$$

et tel que la fonction de transfert du résonateur est un filtre passe-bande du second ordre de la forme :

$$\underline{B} = \frac{j \frac{\omega}{\omega_0}}{1 + \frac{1}{Q} j \frac{\omega}{\omega_0} + \left(j \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

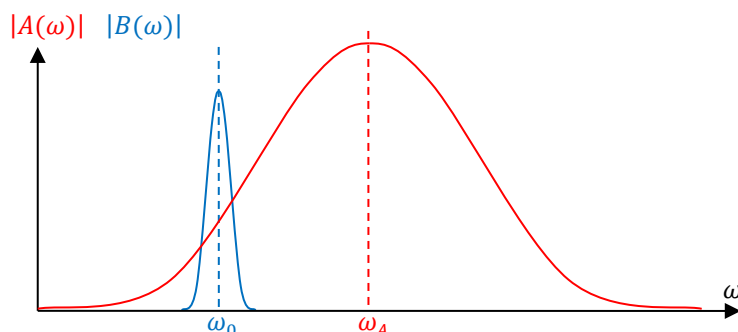
- Dans cet oscillateur, le système A , apportant pour chaque alternance l'énergie nécessaire à compenser l'énergie dissipée par effet Joule, est appelé l'excitateur. Le système B , filtre passe-bande, est appelé le résonateur.
- Les variations de $|A(\omega)|$ et $|B(\omega)|$, dans ce cas-là sont données ci-dessous :



⇒ La fréquence d'accrochage est celle du résonateur (circuit de rétroaction)

b. CAS GENERAL.

- Dans un cas plus général, les spectres d'amplitude du résonateur et de l'oscillateur sont de la forme :

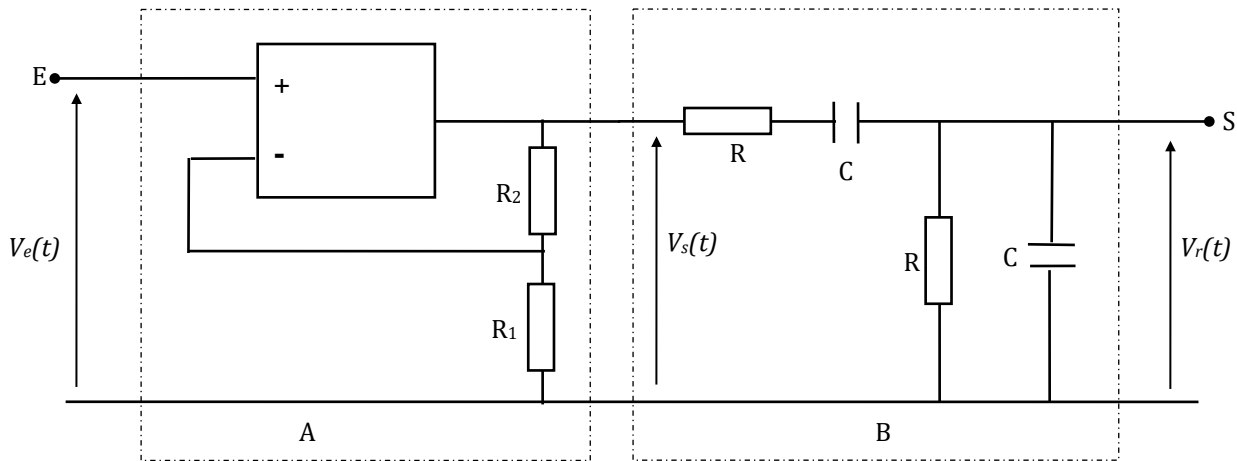


On admet alors les résultats suivants :

- ✓ La condition d'accrochage $|\underline{A} \cdot \underline{B}|_{\omega=\omega_{osc}} > 1$ est satisfaite si les deux courbes se recouvrent suffisamment.
- ✓ La pulsation des oscillations est intermédiaire entre les deux pulsations ω_0 et ω_A .
- ✓ Si l'une des deux courbes est très étroite devant l'autre (souvent le cas du résonateur) alors c'est elle qui fixe la pulsation des oscillations.

II. OSCILLATEUR A PONT DE WIEN

1. MONTAGE



- ✓ Le montage tel qu'il est représenté est le montage en boucle ouverte : les systèmes linéaires A et B étant en cascade et l'impédance de sortie du non-inverseur étant nulle, la fonction de transfert du système en boucle ouvert est :

$$\underline{T} = A \times \underline{B}$$

- ✓ En l'absence de générateur extérieur, si l'on boucle la sortie, repérée par $V_r(t)$, sur l'entrée, repérée par $V_e(t)$, on peut observer, sous certaines conditions des oscillations : on réalise bien un oscillateur à réaction ou oscillateur quasi sinusoïdal.

2. ETUDE THEORIQUE

a. AMPLIFICATEUR

- Montrer que la fonction de transfert de l'amplificateur est :

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} = cste$$

b. RESONATEUR

- Montrer que la fonction de transfert du résonateur est :

$$\underline{B} = \frac{j \frac{\omega}{\omega_0}}{1 + \frac{1}{Q} j \frac{\omega}{\omega_0} + \left(j \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

Avec $Q = \frac{1}{3}$ et $\omega_0 = \frac{1}{RC}$

- Montrer que les fréquences de coupure du filtre sont :

$$\begin{cases} \omega_{c1} = \omega_0 \frac{(-3 + \sqrt{13})}{2} = \omega_0 \times 0,30 \\ \omega_{c2} = \omega_0 \frac{(3 + \sqrt{13})}{2} = \omega_0 \times 3,30 \end{cases}$$

Et donc que :

$$\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} = 3\omega_0$$

- Sachant que $Q < \frac{1}{2}$, le second ordre du dénominateur est décomposable en deux premiers ordres. Montrer que :

$$\underline{B} = \frac{j \frac{\omega}{\omega_0}}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_1}\right) \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_2}\right)}$$

Avec :

$$\omega_1 = \omega_0 \left(\frac{3}{2} - \frac{\sqrt{5}}{2} \right) = \omega_0 \times 0,38$$

$$\omega_2 = \omega_0 \left(\frac{3}{2} + \frac{\sqrt{5}}{2} \right) = \omega_0 \times 2,62$$

- Tracer le diagramme de Bode du filtre et faire apparaître les 4 pulsations caractéristiques.

c. CHAÎNE EN BOUCLE OUVERTE – DIAGRAMME DE NYQUIST

La fonction de transfert de la chaîne en boucle ouverte est donc :

$$\underline{T} = A\underline{B} = \frac{A \times j \frac{\omega}{\omega_0}}{1 + \frac{1}{Q} j \frac{\omega}{\omega_0} + \left(j \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} = \frac{A \times j \frac{\omega}{\omega_0}}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_1}\right) \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_2}\right)}$$

- Montrer que le diagramme de Bode de $\underline{T}$ est identique à celui de $\underline{B}$ à une translation près. Tracer son allure dans Les 3 cas suivants : $A < Q$; $A > Q$ et $A = Q$.

Le diagramme de Nyquist d'une fonction de transfert est la représentation de $Y = \text{Im}(\underline{T})$ en fonction de $X = \text{Re}(\underline{T})$

- Montrer que, dans le cas de l'oscillateur à pont de Wien, on a :

$$\left(X - \frac{AQ}{2}\right)^2 + (Y)^2 = \left(\frac{AQ}{2}\right)^2$$

Tracer l'allure du diagramme de Nyquist dans Les 3 cas suivants : $A < Q$; $A > Q$ et $A = Q$

d. OSCILLATEUR

On boucle la sortie V_r sur l'entrée V_e .

- En considérant que les oscillations sont sinusoïdales, montrer que la pulsation des oscillations est :

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

Et que la condition d'oscillations est :

$$R_2 = 2R_1$$

- En l'absence de dispositif dédié, quel phénomène limite l'amplitude des oscillations ?
- A partir de l'étude indicelle, montrer que :

✓ **Lorsque l'ALI ne sature pas**, l'équation différentielle vérifiée par V_r est :

$$\frac{d^2 V_r}{dt^2} - (A - 3)\omega_0 \frac{dV_r}{dt} + \omega_0^2 V_r = 0$$

En déduire la condition pour le démarrage des oscillations et notamment déterminer la valeur minimale de R_2 pour que les oscillations démarrent (R_{2min}).

✓ **Lorsque l'ALI sature**, l'équation différentielle vérifiée par V_r est :

$$\frac{d^2 V_r}{dt^2} + 3\omega_0 \frac{dV_r}{dt} + \omega_0^2 V_r = 0$$

- A quelle condition l'évolution de V_r est-elle pseudo-périodique ? critique ?

III. ETUDE EXPERIMENTALE

1. MONTAGE

a. CHOIX DES COMPOSANTS

- Choisir les valeurs des composants en respectant les conditions suivantes :
 - ✓ Résistances de l'ordre du $k\Omega^1$,
 - ✓ Fréquence de résonance de l'ordre de 5kHz^2 ,
 - ✓ R_2 correspondant à une boîte à décades pour pouvoir la faire varier facilement.
 - ✓ Amplification $A = 1/Q$
- Mesurer précisément les valeurs des composants choisis et déterminer leurs incertitudes.
- En déduire ³ :

- $\omega_0^{th} = \frac{1}{RC}$ et $\frac{u_{\omega_0}^{th}}{\omega_0^{th}} = \sqrt{\left(\frac{u_R}{R}\right)^2 + \left(\frac{u_C}{C}\right)^2}$
- $\Delta\omega^{th} = \frac{\omega_0}{Q} = 3\omega_0$ et $u_{\Delta\omega}^{th} = 3 u_{\omega_0}$
- $G_{max}^{th} = AQ = \frac{A}{3} = \frac{1}{3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$ et $u_{G_{max}}^{th} = \sqrt{\left(\frac{1}{3R_1} u_{R_2}\right)^2 + \left(\frac{R_2}{3R_1^2} u_{R_1}\right)^2}$
- $R_{2min} = 2R_1$ et $u_{R_{2min}} = 2u_{R_1}$

b. BON FONCTIONNEMENT DU MONTAGE

- Réaliser le montage sur plaquette LAB, à l'exception de la résistance R_2 qui correspondra à une boîte à décades, en vérifiant son bon fonctionnement étape par étape :

La vérification du fonctionnement linéaire d'un filtre se fait en visualisant la forme de la tension de sortie du filtre à l'oscilloscope lorsque l'on applique en entrée une tension sinusoïdale : si le système est linéaire, la tension de sortie doit être sinusoïdale également et sans off-set.

- **Bon fonctionnement de l'amplificateur non inverseur en premier.**
 - ✓ La tension d'entrée du bloc A est un signal sinusoïdal délivré par le GBF. Le système étant linéaire, on doit avoir en sortie de A un signal sinusoïdal de même fréquence.
 - ✓ Causes fréquentes de non-linéarités :
 - Saturation en tension de l'ALI (fréquent pour le montage non inverseur, car il amplifie la tension d'entrée) : dans ce cas, il faut diminuer l'amplitude de la tension d'entrée.
 - Limite de la bande passante de l'ALI (le produit gain/BP étant constant, plus le non inverseur amplifie plus sa BP est limitée) : dans ce cas, il faut diminuer la fréquence.
 - Confusion entre le montage non inverseur et le comparateur à hystérésis (mis à part l'inversion des bornes inverseuse et non inverseuse, ce sont les mêmes montages).
 - ✓ Lorsque le montage ne présente pas de problème de non-linéarités, on vérifie la valeur de A :
 - On visualise à l'oscilloscope les tensions d'entrée et de sortie du bloc A
 - On se place en mode XY : on doit avoir une droite et ceci $\forall$ la fréquence.
 - On vérifie la pente de la droite (A).
- **Bon fonctionnement du pont de Wien à placer à la suite du non-inverseur**
 - ✓ On réalise le bloc B à l'aide de composants libres directement sur la plaquette (sauf R_2 : boîte à décades) à la suite du bloc A.

¹ Une fréquence trop faible pose souvent problèmes (courant débité par le GBF trop important, impédance de sortie du GBF non négligeable, impédance des fils ...). De même une impédance trop élevée pose des problèmes (impédance d'entrée des appareils de mesure pour l'essentiel).

² Une fréquence de résonance trop faible fait que l'étude du diagramme de Bode pour des fréquences inférieures à la fréquence de résonance est très difficile. Une fréquence de résonance trop élevée pose de même des problèmes : bande passante de l'ALI, bande passante des appareils de mesure.

³ Les incertitudes types pour les composants peuvent être déterminées à partir de la tolérance donnée par le constructeur (souvent indiquée sur le boîtier en %) ou alors en mesurant la valeur du composant à l'aide d'un pont de mesure et en utilisant la documentation constructeur du pont pour avoir l'incertitude liée à la mesure. Exemple : pour les résistances des boîtes AOIP, on a : $u_R = 0,2\%R \times \frac{1}{\sqrt{3}}$

- ✓ On vérifie le bon fonctionnement du système en boucle ouverte en visualisant simultanément $V_e(t)$ et $V_r(t)$ à l'oscilloscope :
 - Le système étant linéaire, $V_r(t)$ doit être sinusoïdal.
 - **En faisant varier la fréquence, on vérifie la nature passe-bande du filtre** : la tension de sortie doit être nulle à HF et BF.
 - On se place en mode XY : pour une fréquence quelconque, **on doit avoir une ellipse**. On modifie alors la fréquence et on cherche la fréquence pour laquelle l'ellipse devient une droite : on est alors à la résonance et la fréquence est la fréquence de résonance. On vérifie alors la cohérence de la valeur trouvée pour cette fréquence par rapport à la fréquence de résonance théorique.
 - En fonction de la valeur de A choisie, on vérifie qu'on a bien $V_{r,max} = A Q V_{e,max}$ à la résonance.

En aucun cas on ne commence les mesures avant de s'être assuré que le montage fonctionne correctement

2. DIAGRAMME DE BODE POINT PAR POINT DU SYSTEME EN BOUCLE OUVERTE

a. MESURES

- Fixer la valeur de A :

$$A = \frac{1}{Q}$$

- Mesurer pour différentes fréquences :

$$\log f; V_{e,eff}; V_{r,eff}; H = \frac{V_{e,eff}}{V_{r,eff}}; G_{dB} = 20 \log \frac{V_{e,eff}}{V_{r,eff}}; \phi = \phi_r - \phi_e; X = \operatorname{Re}(\underline{T}) = |\underline{T}| \cos \phi; Y = \operatorname{Im}(\underline{T}) = |\underline{T}| \sin \phi$$

- Avec un multimètre numérique, on mesure uniquement : $f; V_{e,eff}; V_{r,eff}$

Eviter d'utiliser uniquement les multimètres car les non-linéarités n'apparaissent pas

- Avec un **oscilloscope numérique**, on visualise $V_e(t)$ et $V_r(t)$ et on peut mesurer automatiquement $f; V_{e,eff}; V_{r,eff}$ et ϕ
- Avec la carte SYSAM :
 - ✓ On fait l'acquisition des signaux $V_e(t)$ et $V_r(t)$
 - ✓ On mesure automatiquement $f; V_{e,eff}; V_{r,eff}$
 - ✓ La mesure de ϕ nécessite elle l'utilisation du pointeur et de la loupe pour mesurer le décalage dans le temps entre les deux signaux (τ). On détermine alors ϕ grâce à la formule : $\phi = 2\pi\tau f$
- On note les résultats dans un tableur (Regressi, Latis-pro, Excel, code Python...) et on utilise ce tableur pour construire les grandeurs : $H, G_{dB}, \log f, X, Y$.

f	$\log f$	$V_{e,eff}$	$V_{r,eff}$	H	G_{dB}	ϕ	X	Y

- Tracer alors le diagramme de Bode du gain : $G_{dB} = f(\log f)$, le diagramme de Bode de la phase $\phi = f(\log f)$, ainsi que le diagramme de Nyquist $Y = f(X)$.

Dans le compte-rendu, on inclut le tableau de valeurs ainsi que les différents graphes obtenus.

Sachant que **les diagrammes obtenus sont utilisés pour mesurer des grandeurs caractéristiques** (ici ω_0 et A), on choisit judicieusement les fréquences de mesure. Dans le cas présent, on fera de **nombreux relevés autour de la fréquence de résonance et autour de la bande passante**.

- Remarques sur la qualité des tracés :
 - ✓ Obtenir assez de points en BF et à HF pour déterminer avec précision les asymptotes HF et BF
 - ✓ Obtenir assez de points autour de la bande-passante
 - ✓ Le repère pour le diagramme de Nyquist doit être orthonormé (on doit obtenir un cercle) !

b. EXPLOITATION

Pour s'aligner avec le modèle, on trace des droites de pentes ± 20 dB/dec et on essaye de les faire fiter au mieux avec les courbes.

- Mesurer ω_0^{ex} , G_{max}^{ex} et $\Delta\omega^{ex} = \omega_{c2} - \omega_{c1}$ à partir des courbes obtenues.
- Déterminer également $u_{\omega_0}^{ex}$, $u_{G_{max}}^{ex}$ et $u_{\Delta\omega}^{ex}$ ⁴
- Comparer les valeurs trouvées aux valeurs théoriques et calculer les Z-scores. Conclure.

c. PYTHON

- Tracer sous Python :
 - ✓ Les diagrammes de Bode théoriques et expérimentaux
 - ✓ Les diagrammes de Bode théoriques et expérimentaux
 - ✓ Le Z-score sur H et ϕ en fonction de la fréquence
- Conclure

3. OSCILLATIONS

On boucle la sortie sur l'entrée et on enlève le GBF

a. OBSERVATION DES OSCILLATIONS

Observer les oscillations ainsi que le spectre du signal et constater que :

- Pour $A < 1/Q$, il n'y a pas d'oscillations,
- Pour $A \gtrsim 1/Q$, les oscillations sont quasi-sinusoïdales
- Pour $A \gg 1/Q$, les oscillations ne sont plus sinusoïdales et le spectre est très riche en harmoniques.

Conclure quant à la cohérence des observations.

b. MESURES

Pulsation des oscillations

- Mesurer la pulsation des oscillations et faire un calcul d'incertitudes.
- Comparer la valeur trouvée à la valeur théorique et calculer un Z-score. Conclure.

Résistance d'accrochage R_{2min}

- Mesurer la résistance R_{2min} pour laquelle les oscillations démarrent. R_{2min} est déterminée par encadrement : on détermine ainsi la valeur maximale de R_2 pour laquelle il n'y a pas d'oscillations (R_2^a) et la valeur minimale de R_2 pour qu'il y ait oscillations (R_2^b).

$$R_{2min}^{ex} = \frac{(R_2^b + R_2^a)}{2}$$

- En tenant compte de l'incertitude constructeur sur R_2 , en déduire l'incertitude type sur R_{2min} ⁵:

$$u_{R_{2min}}^{ex} = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{(R_2^b - R_2^a)}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{x}{100} \times R_{2min}\right)^2}$$

c. LIMITATION DE LA SATURATION

Afin de limiter l'amplitude des oscillations et donc la saturation, on peut utiliser différents dispositifs.

- **CTN** :
 - ✓ Remplacer R_2 par une thermistance (CTN : résistor dont la résistance diminue quand la température augmente : $R_2 = R_0 e^{-\beta P}$ où P est la puissance thermique reçue).
 - ✓ On remplace R_2 par la CTN de résistance $R_2 = R_0 e^{-\beta P}$

⁴ Dans les trois cas, on aura : $u^2 = u_l^2 + u_c^2 \approx u_l^2$

⁵ x correspond à la tolérance constructeur : indiquée sur la documentation constructeur de la boîte à décades

⇒ Au départ, la condition d'accrochage est vérifiée.

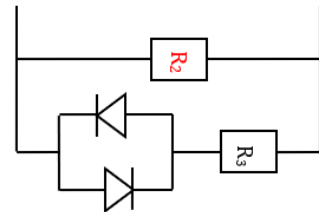
⇒ Lorsque le montage fonctionne, la puissance reçue par la CTN augmente et donc sa résistance diminue.

⇒ Lorsque cette résistance passe en dessous de $2k\Omega$, la condition d'accrochage n'est plus vérifiée et les oscillations s'arrêtent : la puissance P s'annulant, la résistance R_2 augmente et lorsque R_2 dépasse à nouveau $2k\Omega$ les oscillations reprennent.

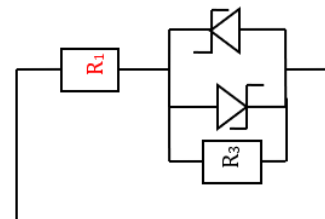
- ✓ Pour quantifier l'intérêt de la CTN, on peut mesurer le THD pour R_2 fixée puis pour $R_0 = R_2$: on doit observer un THD plus petit dans le deuxième cas.

▪ **Montage à diodes (non traité ici) :**

- ✓ Remplacer la branche contenant R_2 par la branche suivante :



- ✓ Remplacer la branche contenant R_1 par la branche suivante :



d. TAUX DE DISTORSION

Définition

- Le taux de distorsion encore appelé distorsion harmonique totale est défini comme le rapport de la valeur efficace globale des harmoniques (c'est-à-dire leur somme quadratique) à la valeur efficace de la composante fondamentale. Il peut s'appliquer soit au courant ou à la tension.
- Expression :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_i H_i^2}}{F_1}$$

Où :

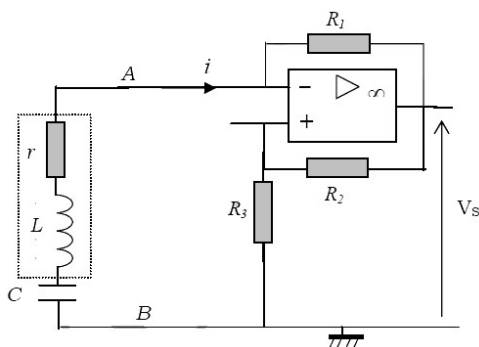
- H_i est l'amplitude de l'harmonique de rang i
- F_1 est l'amplitude du fondamental

Mesures

- Mesurer le THD dans les cas 3 cas suivants :
 - ✓ $R_2 \geq 2R_1$
 - ✓ $R_2 \geq 10R_1$ sans CTN
 - ✓ $R_2 \geq 10R_1$ avec CTN ($R_0 = 10R_1$)
- Conclure

IV. AUTRES OSCILLATEURS

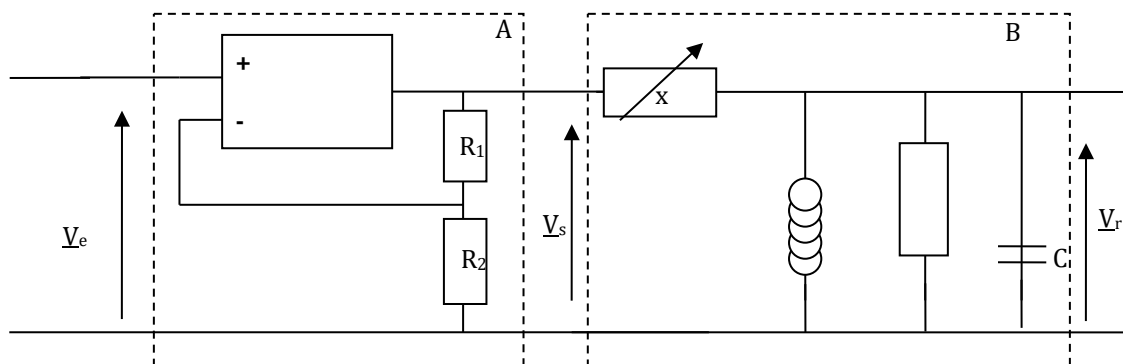
1. OSCILLATEUR A RESISTANCE NEGATIVE.



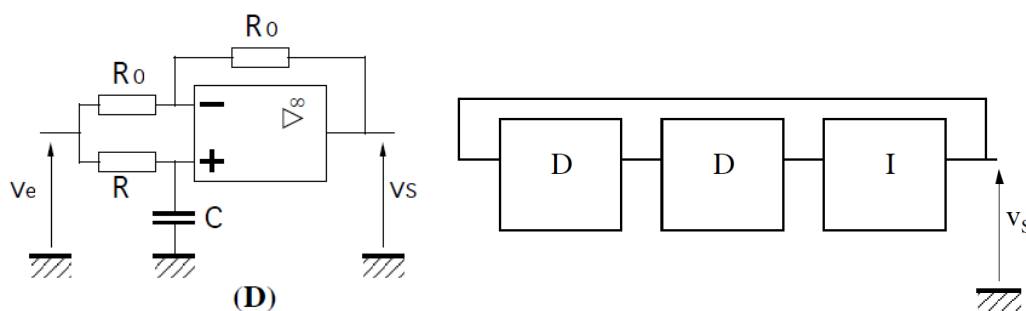
QUELQUES INDICATIONS :

- Montrer que le montage, vu à droite des bornes A et B, est un dipôle passif de résistance négative ($-R$). Exprimer R en fonction de : R_1 , R_2 et R_3 .
- Déterminer l'équation différentielle vérifiée par $i(t)$. Etablir la solution $i(t)$.
- A quelle condition, vérifiée par r , le circuit se comporte comme un oscillateur ?
- Quelle est la pulsation propre ω_0 des oscillations ?

2. OSCILLATEUR LC.



3. OSCILLATEUR DEPHASEUR.



Dans ce montage, (D) est un déphaseur et (I) est un ampli inverseur de gain G .

Montrer qu'il existe une valeur du gain de (I) qui permet au système de devenir un oscillateur quasi-sinusoïdal dont on déterminera la fréquence. Quelle est alors la valeur du déphasage apporté par chaque déphaseur. Interpréter.

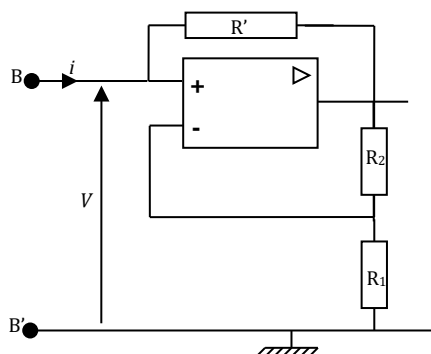
V. EXERCICES

EXERCICE 1

Oscillateur à résistance négative.

On considère un A.O. idéal dont la tension de saturation de la sortie vaut V_{sat} ($V_{sat} > 0$).

L'A.O. est utilisé dans le circuit dipolaire BB'



1. Résistance négative.

- Dans le cas où l'A.O. conserve un régime de fonctionnement linéaire, montrer que le dipôle BB' est équivalent à une résistance négative $-R_N$ ($R_N > 0$) que l'on exprimera en fonction de R_1 , R_2 et R' .
- Le régime de fonctionnement de l'A.O. n'étant plus supposé linéaire a priori, déterminer la caractéristique $i = f(v)$ du dipôle BB' , lorsque v varie entre $-V_{sat}$ et $+V_{sat}$.

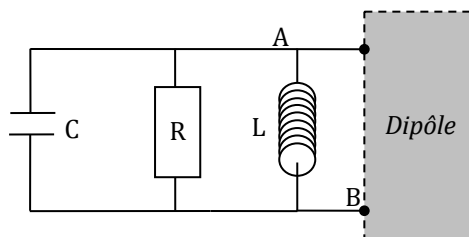
Représenter la courbe $i = f(v)$.

- On admet, dans toute la suite de ce problème, qu'on peut remplacer l'équation $i = f(v)$ de la caractéristique trouvée ci-dessus par l'équation approchée : $i = g(v) = a.v(-1 + bv^2)$ où a et b désignent deux constantes positives. Déterminer les constantes a et b afin que les fonctions $f(v)$ et $g(v)$:
 - Soient nulles pour les mêmes valeurs de la tension v
 - Admettent la même tangente en $v = 0$

On exprimera a et b en fonction de R_N et de V_{sat} .

2. Oscillateur à résistance négative.

Le dipôle ci-dessus est inséré dans le circuit ci-dessous.



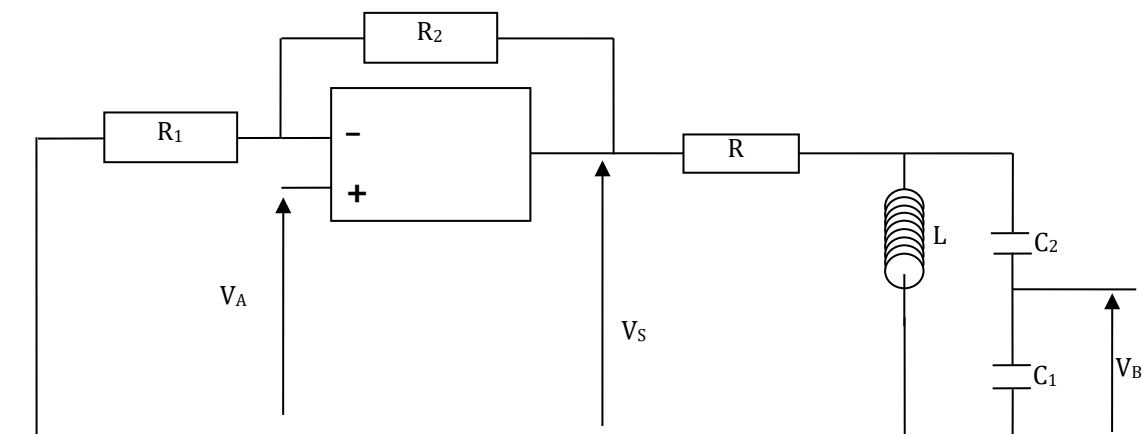
L'A.O. est supposé fonctionner en régime linéaire.

- a. Etablir l'équation différentielle que vérifie la tension $v(t)$ aux bornes du condensateur C .
- b. En déduire la condition pour que le circuit soit le siège d'oscillations sinusoïdales dont on déterminera la pulsation.
- c. Le régime de fonctionnement de l'A.O, n'est plus supposé linéaire a priori et on admet que la caractéristique du dipôle BB' est bien représentée par la relation $i = g(v)$.
 - i. Montrer que l'équation différentielle vérifiée par $v(t)$ est de la forme :

$$\frac{d^2v}{dt^2} - \frac{1}{\gamma} \left(1 - \frac{v^2}{V_o^2} \right) \frac{dv}{dt} + \omega_o^2 v = 0$$
 . Exprimer γ , V_o et ω_o .
 - ii. En partant de $v(0) = 0$, analyser qualitativement le fonctionnement du circuit. Montrer notamment que, en régime permanent, la tension $v(t)$ est (quasi) sinusoïdale de pulsation ω_o .
- d. Déterminer l'amplitude V_m de la tension $v(t)$ en écrivant que, la puissance moyenne dissipée par effet Joule dans la résistance R est compensée par la puissance moyenne fournie par le dipôle BB'. On exprimera V_m en fonction de R , R_N et de V_{sat} .

EXERCICE 2

1. Etablir la fonction de transfert du montage ci-dessous :



2. On relie A et B.
 Quelle est, en régime linéaire, l'équation différentielle vérifiée par $v_B(t)$?
 Qu'observe-t-on ? Sous quelles conditions ?

VI. ANNEXES

1. EXEMPLE DE CODE PYTHON POUR LE TRACE DES DIAGRAMMES DE BODE

```
1 import numpy as np
2 import numpy.random as rd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 #valeurs experimentales
6 f=np.array([50, 100, 500, 1000, 2000, 3000, 3500, 4000, 5000, 6000, 10000, 50000, 100000, 500000])
7 uf=[0.01*x for x in f]
8 Ve=np.array([4.02,4.02,4.02,4.02,4.02,4.02,4.02,4.02,4.02,4.02,4.02,4.02,4.02,4.02,4.02])
9 uVe=[0.01*x for x in Ve]
10 Vs=np.array([0.1850, 0.2950, 1.060,1.810,2.480, 2.640,2.660, 2.690, 2.600,2.500, 2.110, 0.60, 0.3160,0.06])
11 uVs=[0.01*x for x in Vs]
12 phi=[89,86,65,48,22,7,0.6,-4,-11,-19.8, -38.8, -77, -82, -88])
13 uphi=[0.05*x for x in phi]
14 phi_rad=np.array([np.pi/180*x for x in phi])
15 uphi_rad=[0.05*x for x in phi_rad]
16 H=Vs/Ve
17 uH=H*np.sqrt((uVe/Ve)**2+(uVs/Vs)**2)
18 X=H*np.cos(phi_rad)
19 uX=X*np.sqrt((uH/H)**2+(uphi_rad/np.tan(phi_rad))**2)
20 Y=H*np.sin(phi_rad)
21 uY=Y*np.sqrt((uH/H)**2+(uphi_rad*np.tan(phi_rad))**2)
22 Gexp=[20*np.log10(x) for x in H]
23 uGexp=(Gexp/H)*[20/np.log(10)*x for x in uH]
24 logf=[np.log10(x) for x in f]
25 uf=(logf/f)*[x/np.log(10) for x in uf]
26
27 #valeurs théoriques
28 def passeBande(f,Q,f0,A):
29
30     return (A*((1j)*f/f0)) / (1 +1/Q*(1j)*(f/f0)+((1j)*(f/f0))**2)
31
32 def gain(f):
33
34     return np.abs(f)
35
36 def phase(f):
37
38     return np.angle(f)
39
40 def gaindB(H):
41
42     return 20*np.log10(H)
43
44 R=1000
45 uR=10
46 C=44*10**(-9)
47 uC=0.4*10**(-9)
48 R1=1000
49 uR1=10
50 R2=1000
51 uR2=10
52
53 f0=1/(2*np.pi*R*C)
54 Q=1/3
55 A=1+R2/R1
```

```
58 Hth=[gain(passeBande(x,Q,f0,A)) for x in f]
59 Gth=gaindB(Hth)
60 phith=[phase(passeBande(x,Q,f0,A)) for x in f]
61 Xth=Hth*np.cos(phith)
62 Yth=Hth*np.sin(phith)
63
64 print(type(Hth))
65
66
67 print(phi_rad)
68 print(phith)
69 print(upsi_rad)
70
71 #Zscore
72 ZG=np.abs((H-Hth)/uH)
73 Zphi=np.abs((phith-phi_rad)/upsi_rad)
74
75 #Tracés
76 plt.figure("Diagramme de Bode du Gain")
77 plt.xlabel('log(f)')
78 plt.ylabel('GdB')
79 plt.grid()
80 plt.plot(logf,Gexp,'rx-',label='Gexp')
81 plt.plot(logf,Gth,'bx-',label='Gth')
82 plt.legend(loc=2)
83
84
85 plt.figure("Diagramme de Bode de la phase")
86 plt.xlabel('log(f)')
87 plt.ylabel('Phi')
88 plt.grid()
89 plt.plot(logf,phi_rad,'rx-',label='exp')
90 plt.plot(logf,phith,'bx-',label='th')
91 plt.legend(loc=2)
92
93 plt.figure("Diagramme de Nyquist")
94 plt.axis('equal')
95 plt.xlabel('Partie réelle de H')
96 plt.ylabel('Partie imaginaire de H')
97 plt.grid()
98 plt.plot(X,Y,'rx-',label='exp')
99 plt.plot(Xth,Yth,'bx-',label='th')
100 plt.legend(loc=2)
101
102 plt.figure("Zscores")
103 plt.xlabel('log(f)')
104 plt.ylabel('Z')
105 plt.grid()
106 plt.plot(logf,ZG,'rx-',label='ZG')
107 plt.plot(logf,Zphi,'bx-',label='Zphi')
108 plt.legend(loc=2)
```


2. EXEMPLE DE CODE PYTHON POUR L'INCERTITUDE SUR LE THD (MONTE CARLO)

```
from math import *
import numpy as np
import numpy.random as rd

#Valeurs mesurées

H1=[4.271,0.27612,0.16380,0.06240] #Amplitudes des harmoniques (et de la fondamentale en premier) pour R2 équivalent a R2osc, en Volt
u_H1=[0.029,0.00289,0.00289,0.00289] #Incertitudes liées à ces harmoniques en Volt

H2=[10.47,2.173,1.060,0.657,0.446,0.331,0.259,0.201] #Harmoniques pour R2 très grand devant R2osc, en Volt
u_H2=[0.12,0.058,0.058,0.012,0.012,0.012,0.012,0.012] #Incertitudes liées à ces harmoniques en Volt

def THD(H):
    """Renvoie le THD de la liste d'harmoniques H ou H[1] est la fondamentale"""
    r=0 #racine du numérateur dans le calcul du THD
    for i in range(1,len(H)-1):
        r += H[i] ** 2
    r = sqrt(r)
    return r/H[0]

N=10000 #nombre d'itérations

def Monte_Carlo(H,u_H,N):
    """Renvoie la moyenne du THD et son incertitude"""
    THD_sim=[] #liste des valeurs du THD simulé

    for i in range(N):
        H_sim=[] #Valeurs simulées des amplitudes des harmoniques
        for j in range(len(H)) :
            H_sim.append(rd.normal(H[j],u_H[j]))
        THD_sim.append(THD(H_sim))

    moy = np.average(THD_sim)
    u = np.std(THD_sim,ddof=1)

    return(moy,u)

print(Monte_Carlo(H1,u_H1,N))
print(Monte_Carlo(H2,u_H2,N))

#On obtient :
#(0.0751716484773155, 0.000838284439393062)
#(0.2464243458716377, 0.005938922985408836)
```

3. EXEMPLE DE CODE PYTHON POUR L'ETUDE DU REGIME TRANSITOIRE

```
20 import numpy as np
21 import scipy.integrate
22 import matplotlib.pyplot as plt
23
24 R=3e3          # Resistance du Pont de Wien
25 C=100e-9      # Capacite du Pont de Wien
26 A=3.5         # Gain de l'etage d'amplification
27 tfin=15e-3    # instant final de la simulation
28 vsat=15       # tension de saturation de l'A0
29
30 def f(y,t):
31     x,vx = y
32     if abs(x) < vsat/A:
33         return [vx, (A-3)/(R*C)*vx - x/(R*C)**2]
34     else:
35         return [vx, ( -3)/(R*C)*vx - x/(R*C)**2]
36
37 t = np.linspace(0,tfin,10000)
38 sol = sp.integrate.odeint(f,[0.01,0.01],t)
39 e=sol[:,0]
40 de=sol[:,1]
41 s= np.where(abs(e)>vsat/A,vsat*np.sign(e),e*A)
42
43 plt.ion()
44 plt.figure("Réponses temporelles")
45 plt.plot(t,s,label="s")
46 plt.plot(t,e,label="e")
47 plt.axis([0,tfin,-16,16])
48 plt.figure("Trajectoire de phase")
49 plt.plot(e,de)
50 plt.xlabel("e (V)")
51 plt.ylabel("de/dt (V/s)")
52 plt.title("Plan de phase")
53 plt.show()
```

