

LP22 - Rétroaction et oscillations

Gauthier Legrand et Francis Pagaud

27 juin 2020

Bibliographie

- Précis électronique PSI 2005, **Brenders** (Très carré, réintroduit tout bien les notions)
- <https://gitlab.in2p3.fr/Jeremy/Electronique/-/blob/master/Cours/electronique.pdf> (Cours d’Ulm, condensé et clair)
- <http://ressources.agreg.phys.ens.fr/static/TP/serie2/SystemesBoucles.pdf>
- Electronique expérimentale, **Krob** (Si on a les basiques en tête il est vraiment bien, voir ch. 9 puis 5)
- Expériences d’électronique, **Duffait** (On retrouve l’asservissement du moteur p. 330)
- <https://www.dunod.com/sciences-techniques/automatique-systemes-lineaires-non-lineaires-soxhlet>
- Soxhlet http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=20139

Pré-requis :

→

Table des matières

1	Notion d’asservissement	3
1.1	Modélisation	3
1.2	Fonction de transfert d’un système asservi	3
1.3	Exemple : l’amplificateur non-inverseur	4
2	Caractéristiques et optimisation	5
2.1	Sensibilité à la chaîne de retour	5
2.2	Gain et bande-passante	5
2.3	Précision et rapidité	6

3	Système bouclé instable : l'oscillateur	6
3.1	Stabilité	6
3.2	Critère de revers	7
3.3	Exemple : L'oscillateur à pont de Wien	8
3.3.1	Démarrage des oscillations	8
3.3.2	Spectre de l'oscillateur	8

Remarques générales

Plan possible en 30 minutes ne pas parler du critère du revers c'est une bonne idée. Pour la partie sur les oscillateurs ça peut être cool de faire le laser plutôt que Wien en disant que le critère de Barkhausen c'est une condition d'interférences constructives.

Reste à faire Diapo, py, pré-requis

Commentaires du jury

2015 Dans le cas des oscillateurs auto-entretenus, les conditions d'apparition des oscillations et la limitation de leur amplitude doivent être discutées. Le jury souhaiterait que le terme de résonance soit dûment justifié sans oublier une discussion du facteur de qualité. Il n'est pas indispensable de se restreindre à l'électronique.

2009-2013 Le jury n'attend pas une présentation générale et abstraite de la notion de système bouclé. Il estime indispensable de s'appuyer sur au moins un exemple concret et détaillé avec soin.

2007 La stabilité des systèmes bouclés est mal comprise. Le bouclage ne se limite pas uniquement à une fonction d'asservissement. Le lien entre les réponses temporelle et fréquentielle est un aspect important.

Introduction

Bilan du passage de Gauthier : Il faut pas trop s'étendre sur Laplace et le critère du revers. Bien poser les schémas blocs et les dessins des systèmes sur slide dès le début. Barkhausen est un critère très riche déjà en soi. Donc ce qu'on peut faire pour le II : Poser le formalisme schémas-blocs, le pont de Wien, montrer qu'il répond au même schéma, montrer le critère de Barkhausen avec les mains et l'illustrer via le Python. Et s'il reste du temps, on peut parler du Fabry-Pérot comme un système bouclé très simple, via la fonction de transfert.

Correction 2014 Le Diffon + Fruchart : Quant à l'exégèse des commentaires du jury, l'interprétation la plus raisonnable qu'on puisse faire de la mise en garde sur la « confusion entre système bouclé et contre-réaction » est qu'une rétroaction n'est pas forcément négative.

On peut voir un ferromagnétique comme un paramagnétique subissant une rétroaction due à son propre champ magnétique moyen, c'est-à-dire M . Cela correspond au schéma-bloc $M = \chi(H + \lambda M)$ et avec $\chi_{ferro} = \frac{M}{H}$ on obtient la formule de Curie-Weiss.

Dans le cas du multivibrateur instable, il faut détailler le fonctionnement du système, analogue d'ailleurs au vase de Tantale. Cette analogie est pertinente, mais doit être justifiée

par des arguments physiques.

-Ce qu'on a vu jusque là : fonction de transfert. $H(p) = \frac{s(p)}{e(p)}$. Mais ça ne peut pas être suffisant. L'exemple de l'asservissement de la perceuse : si on met un couple en entrée, il se peut qu'il ne soit jamais suffisant pour percer le mur dû à la résistance... Besoin d'une rétroaction.

Il en existe pleins de ces systèmes (grande utilité, lasers, dans le vivant...)! et selon leur utilité, on n'en attend pas la même chose. La perceuse, ça doit percer rapidement. Un asservissement de voiture, c'est pas forcément l'idéal (qui a envie d'être scotché à son siège en activant le régulateur de vitesse?). \Rightarrow doit avoir plusieurs propriétés : précision, fiabilité...

Problématique : Comment réaliser un asservissement ? Quelles propriétés importantes s'en dégagent, et quelle utilité ? (on verra notamment la conception d'oscillateurs ainsi).

1 Notion d'asservissement

1.1 Modélisation

Source : Krob p. 426

-Expliquer ce que cela implique en pratique en terme de conception d'un système : par exemple il est nécessaire d'avoir un capteur de la grandeur de sortie ainsi qu'un comparateur en entrée du système, il faut réfléchir à la conception.

Présentation du moteur d'abord non-asservi en position. On le pousse \rightarrow l'asservissement est foiré... On va rajouter une boucle de retour.

But : Avoir une grandeur physique de sortie (position) proportionnelle à la commande, et que toutes ces valeurs soient constantes. On veut un système du type

$$\theta = KV_{\theta}$$

1.2 Fonction de transfert d'un système asservi

Source : Krob p. 250

-Présentation des schémas blocs. On a une contre-réaction, soit une comparaison, d'où l'usage du "-".

-Exemple : on a une chaîne de retour ici dans le cas du moteur, on la branche. Bien dire que cette chaîne de retour, c'est un capteur qui va détecter la position de la tige.

Source : Duffait p. 333 pour le montage en changeant l'ampli inverseur en l'ampli non-inverseur que l'on va étudier. A tester.

Le dernier bloc, à partir de la résistance à 10 k Ω , est remplacé par un ampli de puissance HSA 4005. On commence avec une résistance R_2 à 1 k Ω

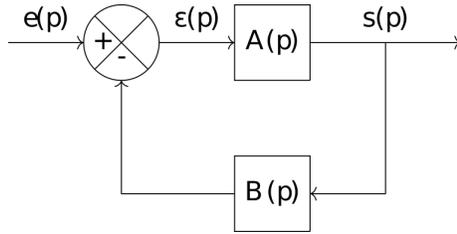


FIGURE 1 – Modélisation sous forme d’une contre-réaction

Regardez, la position est cette fois-ci asservi! Ça marche bien. Principe de l’asservissement avec les mains expliqués dans le Krob p. 250. Mais ne pas oublier que tout cela se réalise dans le cadre de l’ARQS! Tout est instantané.

Faisons une approche un peu théorique → Etablissement de la fonction de transfert

$$s(p) = A(p)[e(p) - B(p)s(p)] \Rightarrow H_{BF}(p) = \frac{s(p)}{e(p)} = \frac{A(p)}{1 + A(p)B(p)}$$

On retrouve bien une proportionnalité entre la sortie et l’entrée si la boucle ouverte à fréquence nulle (régime permanent) A_0B_0 est grande devant 1, super! Le système est très peu sensible aux variations de la chaîne directe A . Ainsi, quel que soit la résistance du mur, on le perce. Quel que soit le poids de la voiture, la vitesse est asservie.

Pour s’en assurer, il faut vérifier le critère, d’où l’intérêt de l’étude de la boucle ouverte. En plus on en déduit les propriétés du système avant de le mettre en route, c’est safe.

Transition : Ok pour le principe, cet exemple est un peu ardu, regardons sur un autre.

1.3 Exemple : l’amplificateur non-inverseur

Source : Précis p.207, cours d’Ulm p.76

-Cet ampli peut s’interpréter par une contre-réaction! On s’intéresse à la fonction de transfert de l’ampli non-inverseur.

Dessin du montage : présentation de la chaîne de retour et de la chaîne directe comme dans le précis. Dans le premier cas : pont diviseur de tension. Dans le deuxième : $A(p) = \frac{\mu_0}{1 + p/\omega_{AO}}$. ODG sur $\omega_{AO} = 50$ rad/s, μ_0 .

Pour la boucle ouverte, on a

$$\bar{A}(p)\bar{B}(p) = \frac{\bar{V}_-(p)}{\bar{e}(p)} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{\mu_0}{1 + p/\omega_{AO}}$$

On résout le bousin en multipliant de part et d’autre de la fraction par $1 + p/\omega_{AO}$, puis on divise par $1 + \frac{\mu_0 R_1}{R_1 + R_2}$, et on obtient :

$$\bar{H}(p) = \frac{H_0}{1 + p/\omega_0} ; H_0 = \frac{\mu_0}{1 + \frac{\mu_0 R_1}{R_1 + R_2}}, \omega_0 = \omega_{AO} \left(1 + \frac{\mu_0 R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

C’est cool, on comprend tout. On a toujours un filtre passe-bas d’ordre un.

On peut jouer avec l'A.O. éventuellement, mais je ne pense pas que ce soit très intéressant.

Dans notre fonction de transfert du moteur, cet élément intervient, il régit la boucle : présentation de la chaîne avec les A.O. Le premier sert de comparateur (signaux électriques dont la valeur importante est la tension, c'est possible à réaliser).

D'ailleurs, si on change l'ampli de sorte à avoir A plus faible (passage à 100 Ω), la réponse n'est pas assez forte pour contre-carrer la variation de sortie (les frottements solides sont plus forts!). Ainsi on évalue grossièrement si le critère de précision établi précédemment est bien vérifié.

Transition : On voit qu'il se passe pleins de choses avec cette contre-réaction, essayons d'en tirer des généralités.

2 Caractéristiques et optimisation

Tout d'abord, évaluons la stabilité du machin. La partie suivante est là pour combler une partie faible, je l'admets :

2.1 Sensibilité à la chaîne de retour

Source : Krob p. 250

On l'a vu précédemment, la réponse dépend presque exclusivement de la chaîne de retour. Ainsi, on peut évaluer son importance via ce petit calcul :

$$\frac{d\theta}{\theta} = \frac{-A_0 B_0}{1 + A_0 B_0} \frac{dB_0}{B_0} \simeq -\frac{dB_0}{B_0}$$

On est en Laplace, ça paraît pas si évident que ça la transition à l'erreur relative. Mais vu qu'on est en statique, a priori, pas de problème. D'où l'importance de soigner la chaîne de retour! Toutes les fluctuations à ce niveau-là se ressentent dans le résultat. (contrairement à la chaîne directe) Cela signifie que le capteur doit être juste et fiable.

2.2 Gain et bande-passante

Source : Précis p. 208

-Effet de la contre-réaction sur le gain et la bande-passante. Dans le cas général ces deux grandeurs sont altérées mais on n'a rien de plus. C'est l'occasion de faire des ODG et de les vérifier expérimentalement peut-être.

Dans le cas de l'A.O. et du montage amplificateur non-inverseur, on a de plus le produit gain-bande qui est exactement conservé, ce qui n'est pas toujours le cas (approximativement pour le montage inverseur).

2.3 Précision et rapidité

Source : Ulm p. 82

-La précision, on connaît, on l'a déjà vu. Il peut exister des termes supplémentaires qui impose une erreur constante. La prépondérance d'un terme sur un autre est importante pour les négliger. De plus, il peut exister une très bonne réponse à un échelon mais une mauvaise réponse à une rampe (erreur de trainage, "Electronique 2, Systèmes bouclés linéaires... , Manneville" ch. 6).

-Pour la rapidité : besoin du formalisme de Laplace, comme vous le savez Fourier est inutile dans le cas où l'on applique un échelon de tension. Pour un système d'ordre 1, cela est fait dans le Précis p. 209. Dans le cas de l'A.O., le temps de réponse est 1000x plus rapide Je ne trouve pas ce résultat très parlant, il y a aussi la bande passante à considérer... Je l'évitais.

-Pour les systèmes d'ordre 2 : il existe des limitations. On cherche à aller le plus vite possible, et pour cela on rend la boucle la plus réactive possible. Pour des graphes et des valeurs, voir p. 47 de "Electronique 2, Systèmes bouclés linéaires... , Manneville", mais c'est dispensable. Donc aussi plus sensible aux petites variations. On sent le compromis avec la précision.

On peut justifier les oscillations par une réponse plus rapide du système que le temps de rétroaction, notamment dû à la phase créée par le système.

-py pour montrer des courbes de réponse ?

→ Compétition avec la précision ! Pour certaines applications ça ne passe pas. Risque de cassure... Pour reprendre l'exemple de la voiture, les oscillations c'est pas cool. Pour d'autres qui doivent être très réactifs, c'est vital.

3 Système bouclé instable : l'oscillateur

3.1 Stabilité

Source : Précis p. 238

Définition de la nouvelle convention : la rétroaction est sommée. C'est plus commode pour la suite et un peu plus physique.

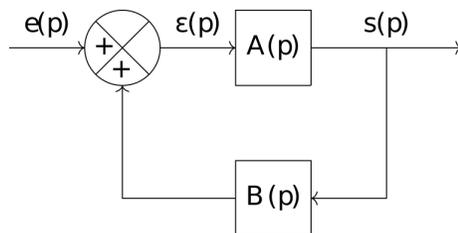


FIGURE 2 – Modélisation sous forme d'une amplification

-**Stabilité** : définition.

-Evolution temporelle du système, on peut écrire l'évolution temporelle comme dans le Krob p. 121 :

$$y(t) = \sum_{i=1}^n f_i(t)e^{p_i t}$$

Avec p_i les racines du polynôme $1 - A(p)B(p)$ obtenu par transformée de Laplace. Si au moins une racine a une partie réelle positive, alors il y a instabilité et croissance.

Transition : Obtention d'un critère

3.2 Critère de revers

Source : Précis p. 239, Krob p. 124

-Donc on a le critère de Barkhausen. Pour ça, on passe de Laplace à Fourier (croissance d'une harmonique, cf. note du Précis p. 239). Traçons $A(j\omega)B(j\omega)$: si cette courbe passe par $(-1; 0)$ pour un argument $j\Omega_i$, alors cela signifie que cette pulsation et sa conjuguée sont des racines.

Condition de Barkhausen en module et en phase, cf. Précis.

On peut préciser que cela est associé à un produit de convolution dans le temps, le fonction de transfert est une fonction de réponse. Dans ce cas-là, pour cette pulsation, la fonction de transfert tend vers $+\infty$, il doit exister une oscillation sinusoïdale (L'implication m'échappe, c'est tiré du Krob).

Pour l'interpréter d'une manière élégante :

$$H = \frac{A}{1 - AB} = A \sum_{i=1}^{+\infty} (AB)^i$$

, c'est le Fabry-Pérot ! Une boucle de réflexion sur les miroirs correspond aux gains pour la variation du module et aux interférences pour le critère sur la phase.

On peut alors détailler le laser : besoin d'avoir des gains dûs au milieu amplificateur plus importants que les pertes (transmission sur les miroirs, pertes par absorption puis émission spontanée, d'absorption/diffusion sur les miroirs et leurs petits défauts) et la condition de phase. Chaîne directe : amplification et réflexion sur un miroir. Chaîne de retour : Une nouvelle réflexion pour additionner le rayon aux autres. Alors on obtient un critère de Nyquist avec les mains : il faut que le gain compense les pertes. (Houard p. 354 et figure 11.16 pour l'idée)

Ainsi on est censé avoir une oscillation sinusoïdale exactement pour cette valeur de $\omega = \Omega_i$.

Comme on le voit avec le laser, ce critère n'est jamais parfaitement réalisé (fluctuations du système pour la courbe AB , besoin de dépasser cette valeur de 1) et même si c'était le cas, on n'explique pas la croissance des oscillations, juste le fait qu'il y a oscillation à cette pulsation.

Dans le diagramme de Nyquist, tracé en régime sinusoïdal forcé, on n'a pris que les valeurs de $p = j\omega$. Mais il existe aussi toutes les valeurs réelles des variables de Laplace. Or, à l'intérieur du lacet formé par l'étude de la boucle ouverte, cette partie réelle est

positive. Donc si le lacet entoure $(-1;0)$, la partie réelle positive est tout à fait possible en ce point, l'instabilité l'est aussi. Si le lacet ne l'entourait pas, la valeur de p en $(-1,0)$ aurait une partie réelle négative, pas d'amplification.

-Toute source de bruit pourra déclencher l'oscillation. Il y a amplification du bruit de fond \Rightarrow Nécessité d'avoir un dipôle actif quelque part.

3.3 Exemple : L'oscillateur à pont de Wien

Source : Krob p. 131, Précis p. 244, Ulm p. 102

3.3.1 Démarrage des oscillations

-Présentation du système. Bien l'introduire comme le fait le Précis p. 244 : système instable, réaction positive. La fonction de transfert est admise. Application de la condition de Barkhausen : on obtient une borne inf de la résistance R_2 pour obtenir des oscillations.

Observation de la naissance des oscillations. On peut faire une acquisition en single pour que ce soit joli et rapide.

Idéalement : on passe en boucle ouverte et tracé du diagramme de Nyquist si possible pour montrer qu'on entoure le point $(-1;0)$ (ou on montre les points de préparation, ou en Py, on sinon on la dessine)

Pour voir les choses de manière plus classiques, on repasse en temporelle \Rightarrow Transformée de Fourier inverse. On obtient l'oscillateur harmonique amorti avec un coeff d'amortissement inférieur à 0 (Ulm p. 103). C'est logique ! Mais bon, ça reste vrai dans le cadre d'une modélisation linéaire. **Je pense que cette étape est intéressante mais il y a un coup de baguette magique.**

On peut voir qu'il y a saturation à cause des non-linéarités de l'A.O. C'est bien ça qui réalise la stabilisation (si c'est pas a stabilisation à 15 V, c'est la saturation en courant à 20 mA). De plus, ça a une influence sur le spectre. Et le spectre c'est très important si on veut un oscillateur bien sinusoïdal !

3.3.2 Spectre de l'oscillateur

Source : Krob p. 120

-Pourquoi on n'est pas sinusoïdal : influence de la bande passante (a-priori cette bande passante est toute la partie du spectre dont le gain est supérieur à 1 et la phase pas trop déconnante, comme pour le laser en fait) et des non-linéarités (harmoniques + distorsion).

Pour montrer la distorsion, augmentation franche de la résistance afin d'avoir un spectre très riche.

De plus, le régime transitoire est plus court, c'est logique.

-Sur les non-linéarités : limitent aussi les oscillations.

Conclusion

On a vu des systèmes améliorés par une contre-réaction et d'autres rendus instables. Ils ont chacun leur utilité et les critères d'optimisation dépendent avant tout de leur but.

Par exemple l'oscillateur étudié ici il est un peu tout pourri : fréquence pas très haute (~ 10 kHz), facteur Q de 1/3, donc c'est chiant. On peut aller plus loin avec des lasers à très grande finesse et même des oscillateurs électroniques très précis (cf. l'oscillateur Colpitts, dit "à quartz").

De grande utilité (montres, horloges atomiques).

Ouvertures possibles : Après il existe d'autres systèmes : la PLL, le VdP, le multivibrateur astable.

Commentaires pendant la prépa aux oraux

- Ne pas oublier les notations complexes.
- Connaître l'effet Larsen, d'autres oscillateurs auto-entretenus...
- L'ordre n d'un système se traduit sur sa boucle ouverte $AB = \frac{K}{(1+\tau p)^n}$. Ainsi, en transformée de Laplace, un système d'ordre n donne un polynôme d'ordre n . En regardant la phase, un ordre n crée un déphasage max de $(-n\frac{\pi}{2})$. Si l'ordre du système est 2, alors le déphasage max est de $-\pi$, le point $(-1;0)$ ne peut pas être entouré \Rightarrow pas d'oscillateur. Nécessité d'avoir un ordre 3.
- Plein de choses à savoir sur Wien et à ne pas dire. La fréquence d'oscillation ne sera pas observée si elle n'est pas dans la bande passante de l'A.O., celui-ci n'étant plus idéal. Et il faut s'assurer que le temps de montée respecte le slew-rate de l'A.O. par exemple, ce qui arrive vers 100 kHz.
- PLL : Hprépa vert "Electronique I" (et non "Electronique" !)
- Attention, la modélisation en blocs aussi simplistes suppose que ces blocs soient invariants sous pleins de paramètres, et notamment ne dépend pas des blocs en aval, ce qui est rarement le cas.
- <http://www.bibmath.net/dico/index.php?action=affiche&quoi=.v/valinitiale.html>.

Questions

- asservissement en vitesse vs en position ?
- Dans vos différents exemples, c'est des rétroactions positives ou négatives ? Systèmes asservis (ampli non inverseur, ascenseur, régulateur de vitesse...) = rétroaction négative pour avoir une stabilisation, oscillateur autoentretenus = rétroaction positive car oscillations dues à une déstabilisation/instabilité
- Dans l'oscillateur à pont de Wien, la condition de Barkhausen sur la phase c'est quoi ? Pourquoi vous ne l'avez pas dit alors ? parce que la condition sur le gain est toujours intuitive quand on abandonne Barkhausen pour regarder plutôt Nyquist, alors que la condition sur la phase n'est utile que dans le cadre très restreint de

- Barkhausen.
- Quand on boucle l'ampli non inverseur, on change le type de circuit ? Non juste le gain et la bande passante
 - Là un élève demanderait, pourquoi vous dites $Re > 0$ alors que sur le diagramme de Nyquist c'est $Re < 1$?
 - Comment on pourrait modéliser les pertes par les miroirs dans votre schéma à rétroaction positive ? Vous pouvez réexpliquer ce qui se passe quand vous prenez une résistance R_2 très grande ? Il se passerait quoi si on augmentait le R des miroirs ? La forme des pics s'appellerait comment ?
 - Exemple de système asservi pour éviter les fluctuations thermiques ?
 - Vous parlez de quel laser dans votre exemple ? Il est fait de quoi le milieu amplificateur dans un He-Ne ? Comment on fait le pompage ? C'est quoi la condition sur le nombre de niveaux pour qu'il y ait amplification ? Autres conditions à respecter ?
 - On cherche toujours à avoir des lasers monomodes ? En pratique c'est des lasers monomodes qu'on a ? C'est des modes transverses ou longitudinaux ?
 - Dans l'oscillateur de Wien, c'est quoi l'équivalent du pompage ? Alimentation de l'AO
 - Vous dites que si la croissance des oscillations s'arrête, c'est à cause de la saturation de l'AO, mais là c'est plutôt 4.5V que 15V, pourquoi ? Limitation en courant.
 - fonctionnement montre à quartz ?
 - Fonctionnement de l'A.O. ?
 - comment est-ce que l'on peut stabiliser un oscillateur à pont de Wien avec une ampoule à incandescence ? Si stabiliser = avoir des oscillations qui durent, on peut mettre l'ampoule à la place de R_2 , et la résistance du filament augmente avec la température donc plus on va mettre de puissance dans l'ampoule plus on va augmenter la résistance jusqu'à respecter Barkhausen.
 - Un système instable est-il toujours un oscillateur ? Si non, sous quelle(s) condition(s) l'est-il ?
 - Pourquoi utiliser la transformée de Laplace et pas la transformée de Fourier ? La transformée de Laplace permet de traiter les régimes transitoires alors que la transformée de Fourier ne peut être employée que pour les régimes permanents.
 - Pourquoi y a-t-il un dépassement de consigne avec le moteur asservi en position ? Les systèmes asservis du premier ordre n'ont, en théorie, pas de dépassement de consigne, mais ce n'est pas le cas des systèmes du second ordre comme le moteur asservi. Pour avoir l'ordre du système, il faut regarder la chaîne directe dans son intégralité. En l'occurrence, il s'agit d'une succession de modules d'ordre 1, la chaîne globale est au moins d'ordre 2.
 - Quand la fonction de transfert est plus grande que 1 pour toute une bande pourquoi on ne voit pas toutes les fréquences apparaître ? Comment sont créées les oscillations quand on boucle le système ?
 - Quel avantage à se placer en Laplace ? Quel intérêt de l'étude de Fourier ? (on a des SLIT, c'est pratique)
 - Comment réaliser une contre-réaction (génératrice tachymétrique par ex.). Comment supprimer une erreur systématique ? Un intégrateur/dérivateur.

Passage Thomas 6 mai, corrigé par Samuel Boury

- Hypothèses pour l'AO idéal? Temps caractéristique? Produit gain-bande?
- Donner des exemples de régime saturé pour l'AO qui sont utiles : comparateur à hystérésis
- Intérêt de regarder les FTBO et FBTF? Si le système oscille (ie pas stable) on peut comprendre comment il fonctionne avec la FTBO, pas la FTBF
- Comment on voit l'ordre du système? Donner un exemple de système de troisième ordre?
- Que se passe-t-il au niveau de la stabilité quand on a un ordre 3 (au dénominateur)? Il y a nécessairement un pôle dont la partie réelle est non nulle, et donc c'est instable. (c'est vrai pour tous les ordres impairs, sauf pour l'ordre 1)
- Qu'est-ce qu'un diagramme de Bode? (ne pas oublier gain et phase)
- Qu'est-ce qu'on peut utiliser à la place d'un ampli de puissance? Ça dépend ce qu'on veut, penser un PUSH-PULL ça marche aussi (voire mieux)!
- Pour le pont de Wien : faire un court-circuit puis
-
-
-