

Conception et test d'un filtre analogique avec le logiciel CleoVIEW

Introduction

Le logiciel CleoVIEW (*) intègre des applications de simulations et d'acquisition de mesures ce qui permet au final de comparer des résultats attendus (cahier des charges) avec des résultats expérimentaux.

Cet article présente une utilisation sur le thème du filtrage analogique illustrant la démarche :

- simulation du problème : obtention de résultats théoriques (fonctions maths.)
- simulation avec logiciel spécialisé (Orcad/PSPice) : résultats simulation
- mesures sur le système réel : résultats pratiques
- comparaison des différents résultats : analyse et interprétation des écarts

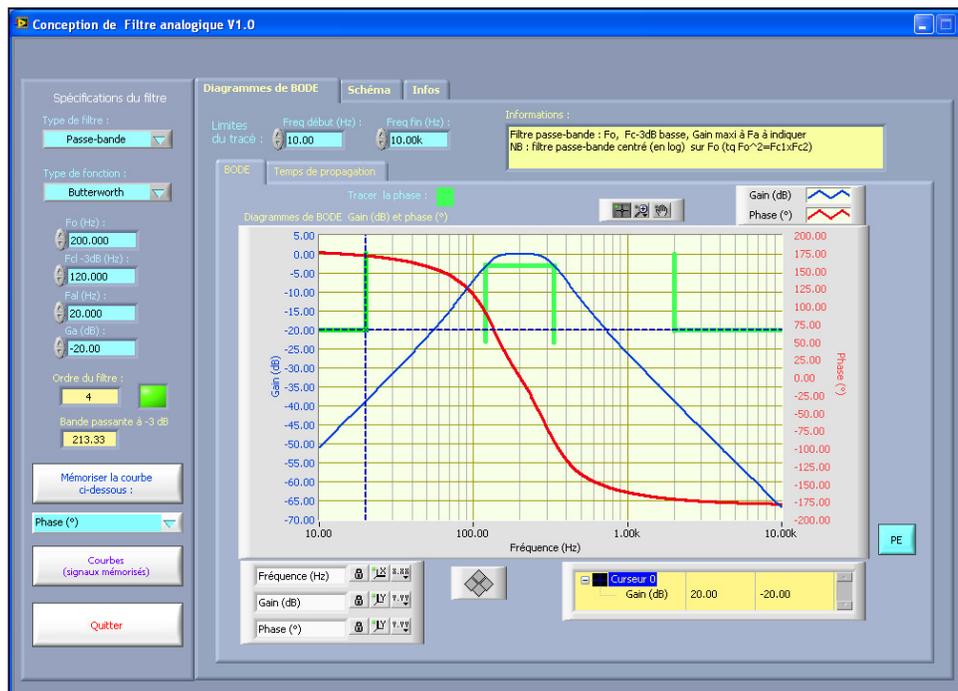
1) Conception de la structure de filtrage

L'application « Conception de filtre analogique » donne la possibilité à l'utilisateur de spécifier son filtre sous la forme d'un gabarit. Si les critères de réalisation sont respectés, on obtient en sortie une proposition de montage avec les valeurs des composants (Cf en Annexe un rappel des notions essentielles sur les filtres).

Soit par exemple un filtre passe-bande avec les caractéristiques attendues :

- ⇒ fréquence centrale $F_0 = 200$ Hz
- ⇒ bande passante à -3 dB : 210 Hz, centrée sur F_0 (au sens log)
- ⇒ atténuation minimale de 20 dB à 20 Hz
- ⇒ fonction de réglage souhaitée de type Butterworth

L'utilisateur rentre les données via l'interface graphique et ajuste les paramètres de réglages (ici la fréquence de coupure basse à -3 dB, de façon à avoir 210 Hz de bande passante). La courbe du gain doit rester entre les zones vertes (gabarit) :



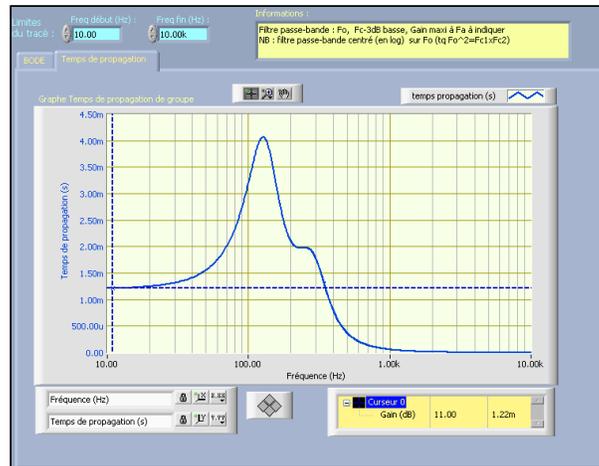
(*) [lien vers informations et téléchargement en fin d'article](#)

On note qu'ici un filtre d'ordre 4 suffira.

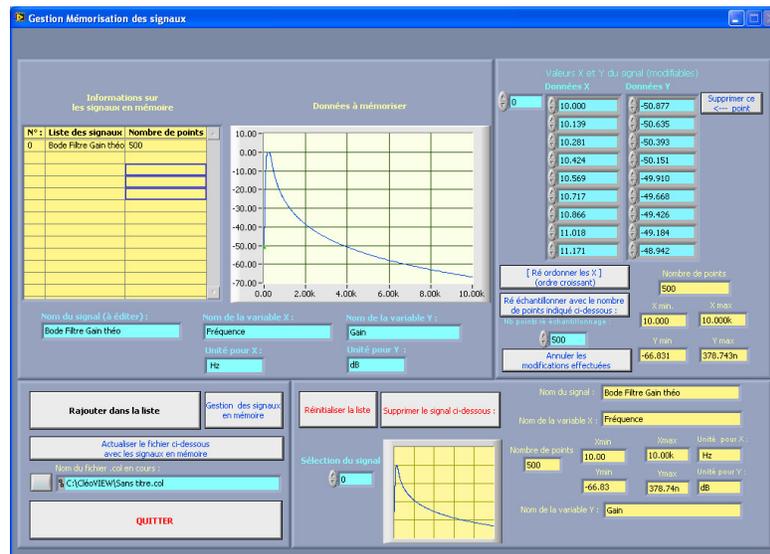
Les possibilités d'ajustement de la fonction de filtrage de la version actuelle sont :

- ⇒ ordre 8 au maximum
- ⇒ types de filtre : type passe-bas, passe-haut, passe-bande et réjecteur
- ⇒ fonction polynomiale de Butterworth, Bessel ou Chebychev 1 dB et 3 dB d'ondulation
- ⇒ génération des schémas correspondants

Le tracé complémentaire du temps de propagation de groupe est accessible :

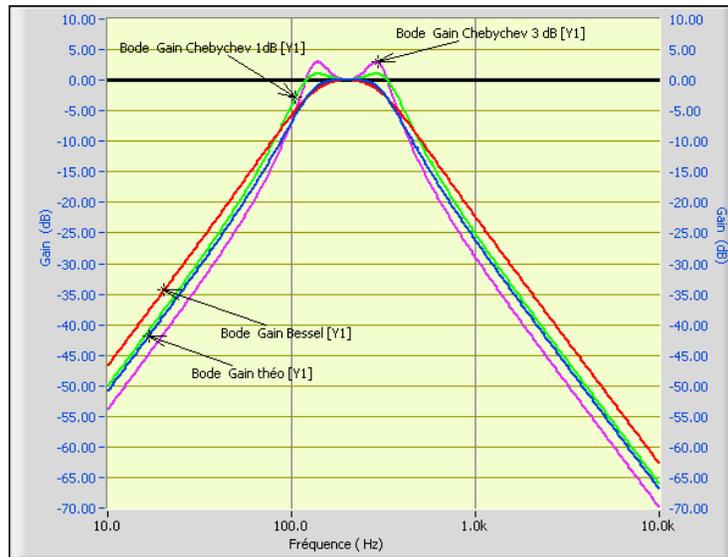


Dans l'objectif de comparer ces résultats avec les mesures à venir, on mémorise les courbes du gain et déphasage :



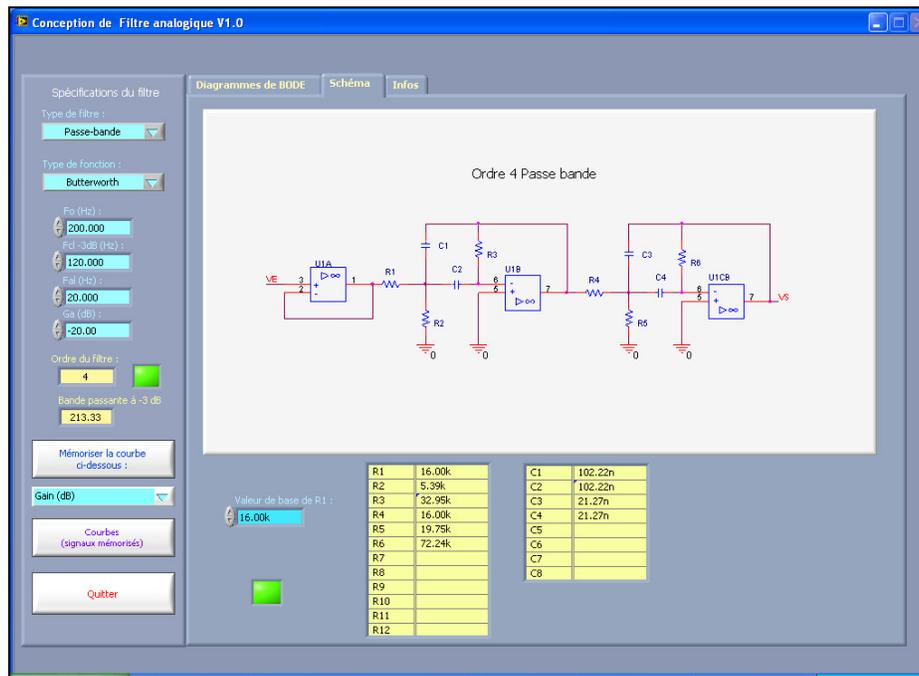
Chaque courbe/signal mémorisé est défini par un tableau des x, un tableau des y, un nom, un nom de variable en x, en y et des unités.

En recherchant différentes fonctions de réglage, en mémorisant les résultats, on superpose les différentes réponses via le bouton 'Courbes', exemple de comparaison pour un ordre 4 :



On note qu'ici, pour l'ordre 4, les courbes de réponse Butterworth et Chebyshev 1dB sont semblables dans les zones de fréquence atténuées.

A l'onglet 'Schéma' on obtient les indications pour la réalisation :



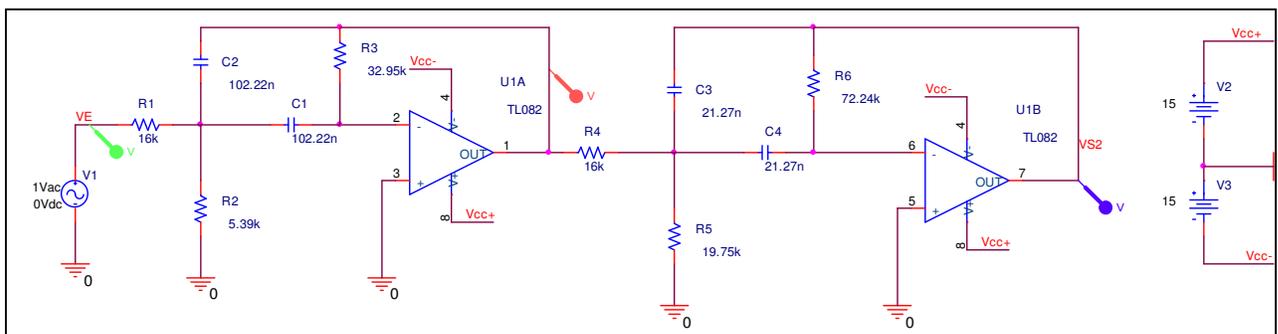
Pour la fonction de Butterworth on indique la valeur de base de R1 : son ajustement se fait de façon à obtenir des valeurs pratiques (et réalistes) par ailleurs.

Lors de la réalisation pratique, se posera en effet un problème de respect des valeurs proposées.

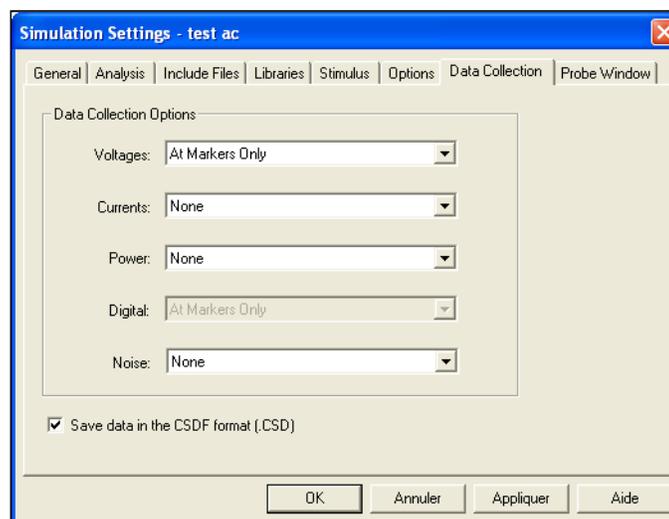
Note : certaines spécifications ne peuvent pas toujours être respectées par la structure proposée, il faut alors les retoucher.
Afin de valider le schéma proposé, et avant de se lancer dans la fabrication, il est préférable de vérifier par la simulation électronique que le gabarit est bien respecté, et que les courbes de réponse concordent.

2°) Validation par la simulation

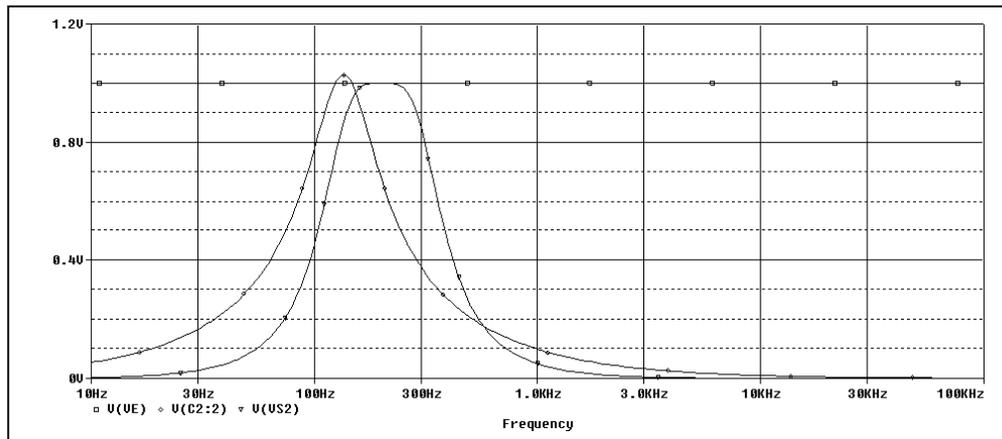
Il faut disposer d'un simulateur autorisant la sauvegarde des résultats dans un fichier de format CSDF (Common Simulator Data Format) : ceci autorise ensuite la récupération des courbes dans CleoVIEW, puis leur superposition afin de comparer.
L'exemple suivant montre la démarche avec le logiciel de CAO Orcad/PSpice.
Avec une fréquence F_0 de 200Hz on peut se contenter d'amplificateurs opérationnels standards.
Schéma de simulation :



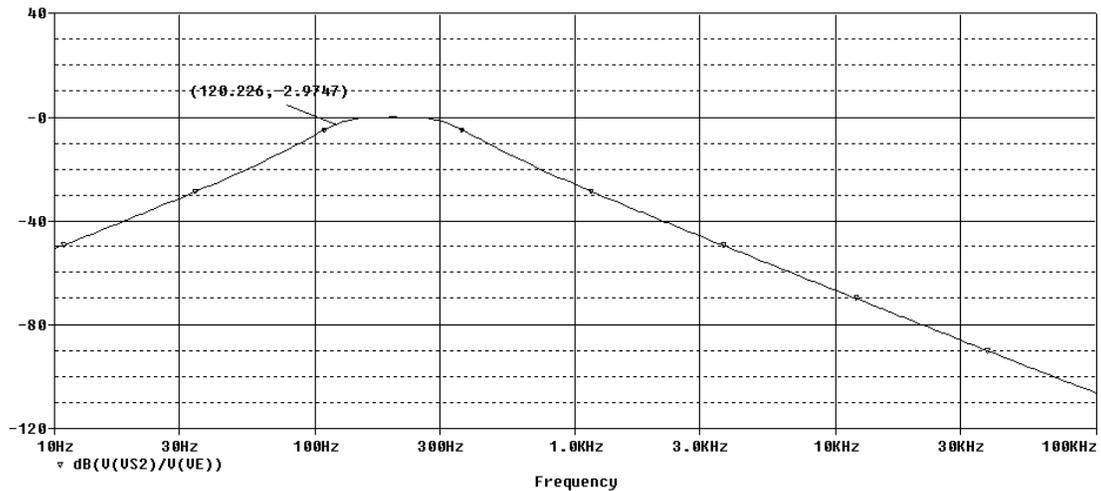
Dans le profil de simulation on demande une étude en AC, de 10 Hz à 1MHz et enfin on édite l'onglet 'Data Collection' pour archiver les résultats au format CSDF tout en limitant l'enregistrement aux signaux utiles :



Si le schéma est exempt d'erreur, les signaux VE, VS1 et VS2 apparaissent :

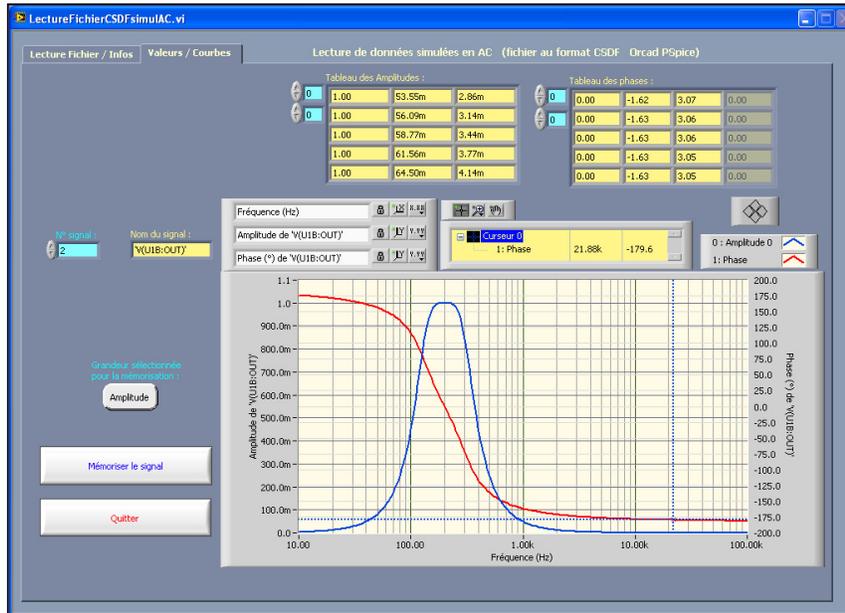


C'est l'allure d'un passe-bande, le filtre complet est obtenu par l'association de 2 passe-bandes légèrement décalés. Ensuite on trace le gain ($\text{dB}(V(\text{VS2})/V(\text{VE}))$) :

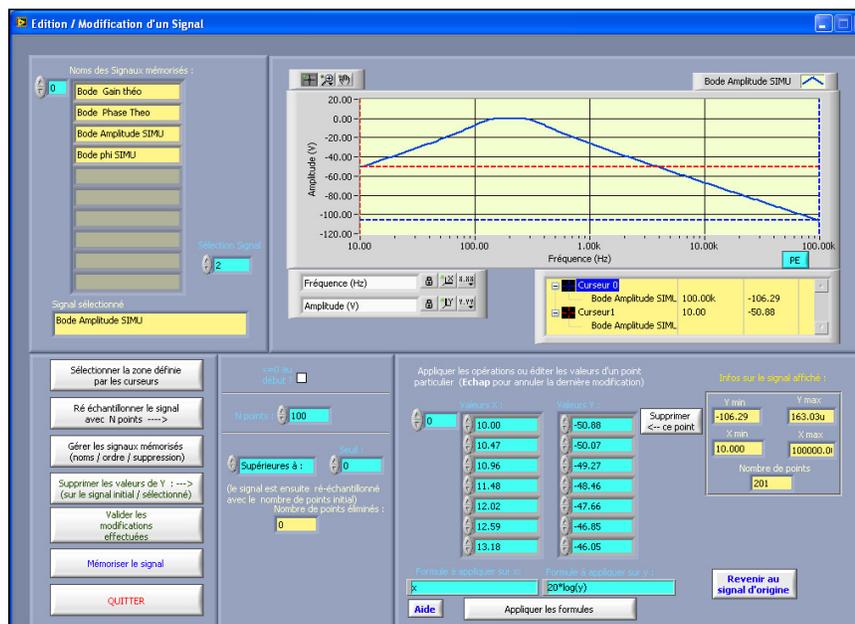


L'allure générale correspond à ce qui était attendu, de même que la fréquence de coupure basse, proche de 120 Hz.

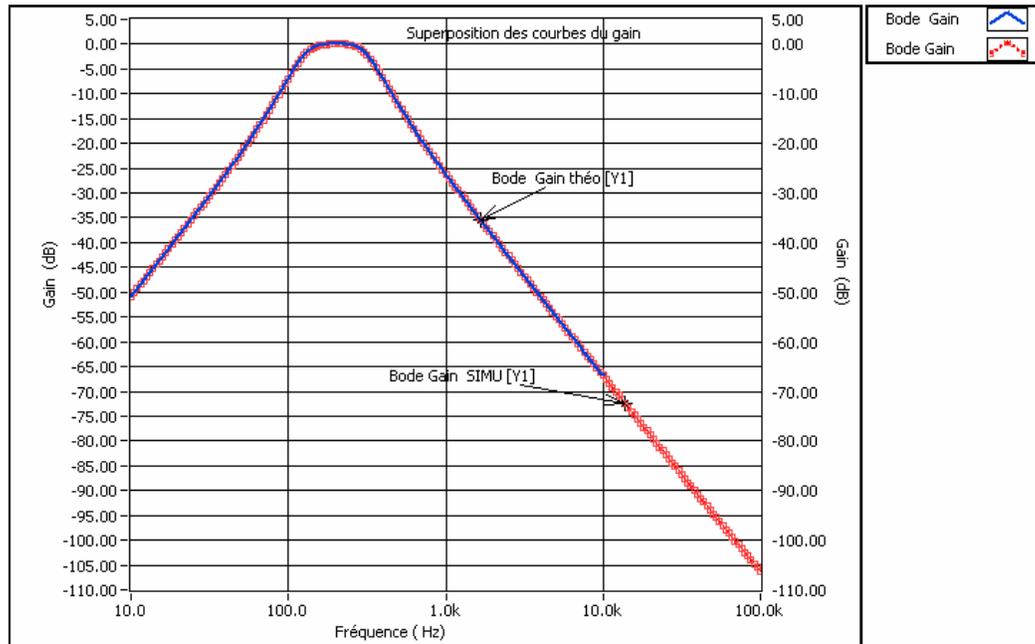
Dans CleoVIEW, on importe le fichier .csd contenant les résultats de l'étude AC, et on mémorise les signaux Amplitude VS2 et phase.



L'application Edition/modification d'un signal sert à calculer le gain :

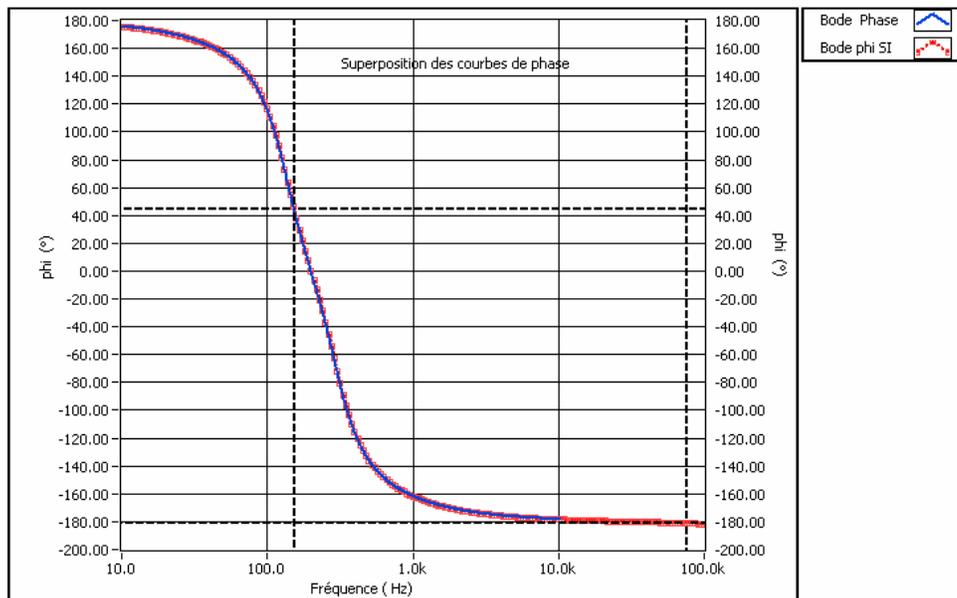


Pour ensuite superposer les courbes du gain théorique et simulation :



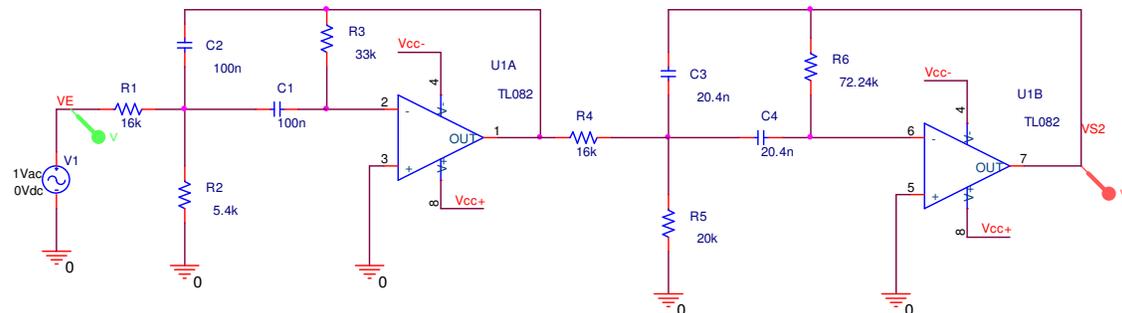
L'accord est très bon : il résulte de la justesse de la fonction de transfert du montage proposé.

Superposition des réponses en phase :

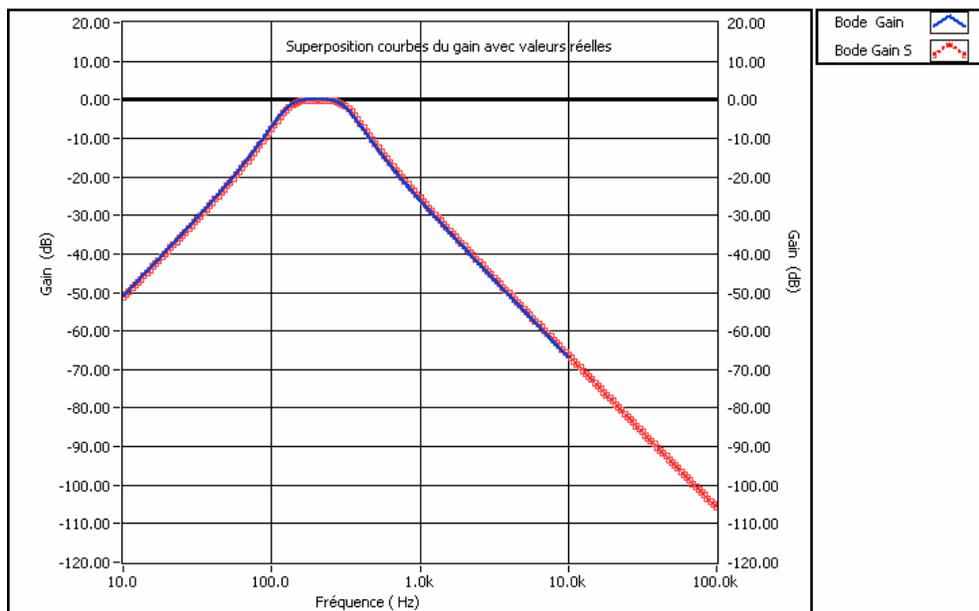


La concordance reste aussi satisfaisante.

L'étape suivante consiste à faire la simulation en tenant compte des valeurs effectives des composants. En associant en série ou en parallèle des valeurs courantes, ou en choisissant une valeur assez proche, on va modifier légèrement le comportement global :



Après simulation et import dans CléoVIEW, les gains restent proches :



Conclusion intermédiaire :

La fonction de filtrage est réglée, la structure validée, il faut passer à la réalisation puis au test.

3°) Réalisation et test du montage réel

Lors de la réalisation pratique, les tolérances des composants vont intervenir : selon la finalité du filtre il peut être souhaitable de vérifier les valeurs exactes des éléments. Avant de produire des Bode automatiques avec CléoVIEW, tester avec les méthodes habituelles ... GBF et oscillo.

CléoVIEW propose ensuite 3 applications pour produire les diagrammes de Bode expérimentaux du filtre, selon les matériels employés :

- Etude en fréquence avec carte d'acquisition NI de type PCI 6221M ou équivalent (possibilité de générer des signaux sinus jusqu'à la fréquence maximale d'étude)
- Etude en fréquence avec module d'acquisition NI PCI ou USB6008/9 associé à un Générateur Basse fréquence (GBF) piloté via l'entrée de modulation
- Etude en fréquence avec GBF et oscilloscope Agilent : typiquement les appareils 33120A (GBF) et 54621A (oscilloscope)

3.1) Etude en fréquence avec carte de type NI PCI 6221M

On utilise la sortie AO0 de la carte comme signal v_e de test, tension d'entrée du filtre, et on relève les tensions v_e et v_s sur plusieurs périodes.

Note : la génération du signal v_e nécessite une certaine performance au niveau de la carte (canal DMA indépendant, Fréquence maxi d'échantillonnage, etc.)

Des calculs permettent d'évaluer les transmittances, gain et déphasage pour chaque fréquence réglée dans la gamme définie par l'utilisateur.

The screenshot shows the CléoVIEW software interface for Bode analysis. The main window is titled "Etude en fréquence (BODE) avec carte PCI NI".

Left Panel (Settings):

- Carte déclarée en DEVI : Carte NI PCI
- Connexions : $V_e \rightarrow$ AO 0 et AI 0, $V_s \rightarrow$ AI 1
- Fréquence début (Hz) : 10
- Fréquence fin (Hz) : 2.0k
- Nombre de mesures : 20
- Amplitude maximale de V_e (V) : 1.41
- Offset (V_e moyenné, V) : 0
- Durée approximative des mesures (s) : 15
- Buttons: Lancer les mesures, Mémoriser le signal indiqué ci-dessous, Gain (dB), Courbes (signaux mémorisés), Identification de la réponse, Quitter

Main Panel (Suivi des mesures standard):

- Fréquence en cours (Hz) : 2000.00
- G (dB) : -37.13
- Déphasage (°) : 194.76
- Graph: "Signaux acquis AI 0 (V_e) et AI 1 (V_s)" showing two waveforms over time (0 to 7ms).
- Controls: Ve, Vs, t (s), ve(t) et vs(t), Curseur 0 (Ve: 0, Vs: -1.09245)

Bottom Panel (Paramétrage acquisition):

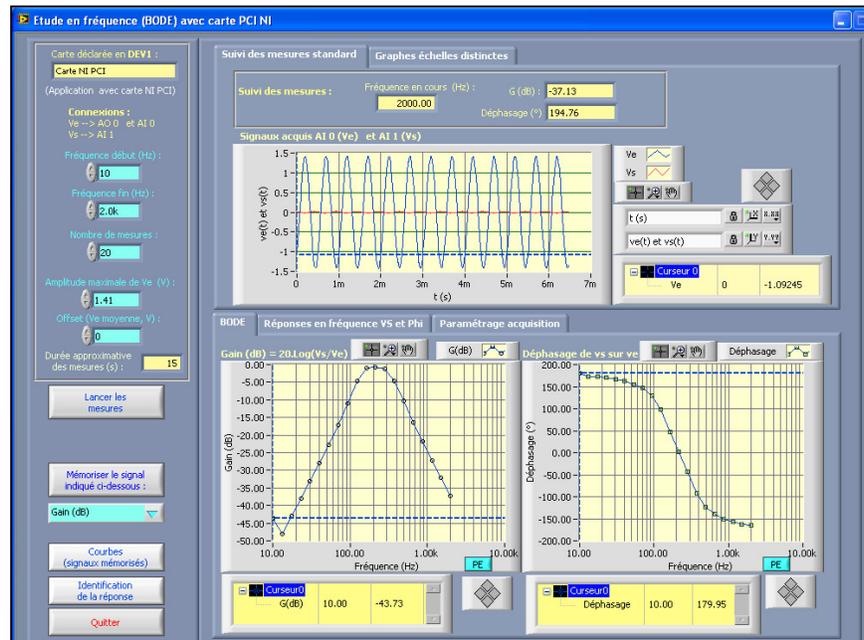
- Nombre de périodes à acquérir : 13
- Nombre de points total à acquérir : 700
- Calibres: AI-0 (V_e): +/- 10, AI-0 (V_s): +/- 10
- Fréquence d'échantillonnage maximale demandée (Hz) : 215385 (F ech max = 2*F req Fin * NBpoints / NBpériodes)
- Facteur multiplicatif de V_s : 1.000
- ATTENTION : Si la valeur demandée dépasse la fréquence max pour la carte utilisée, une erreur sera générée lors des mesures.
- Réglage Acquisition: [OK]
- Nombre de points pour définir la sinuséide v_e : 50
- F ech max demandée (Hz) : 100000
- Attente (s) après la génération : 0.5
- Réglage Génération: [OK]

Right Panel (Compte-rendu d'erreur suite à la dernière mesure):

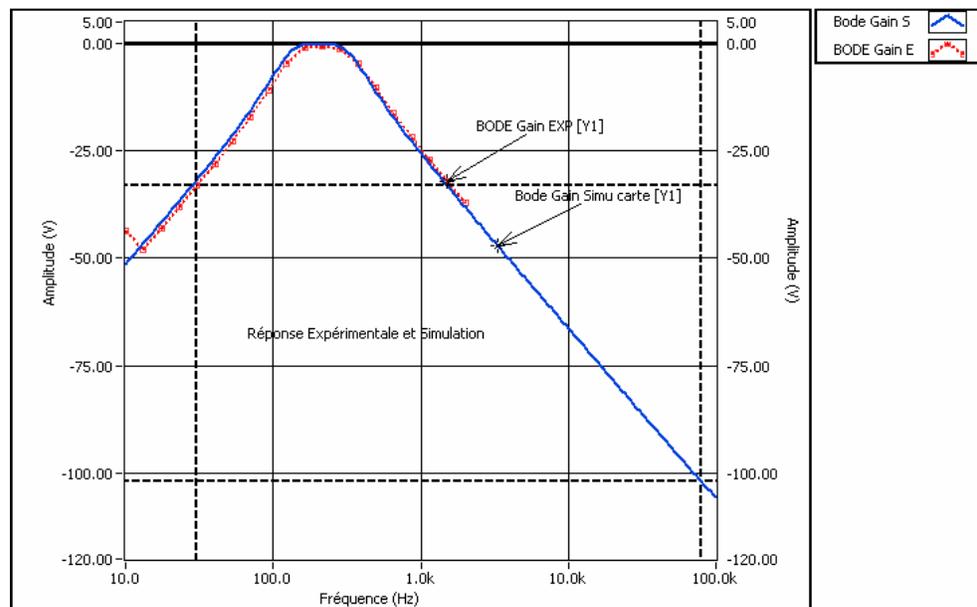
- sortie d'erreur: status (checkmark), code (0), source

Il faut indiquer la plage de mesure en fréquence puis paramétrer l'acquisition pour respecter les possibilités de la carte au niveau acquisition des signaux.

Résultats :

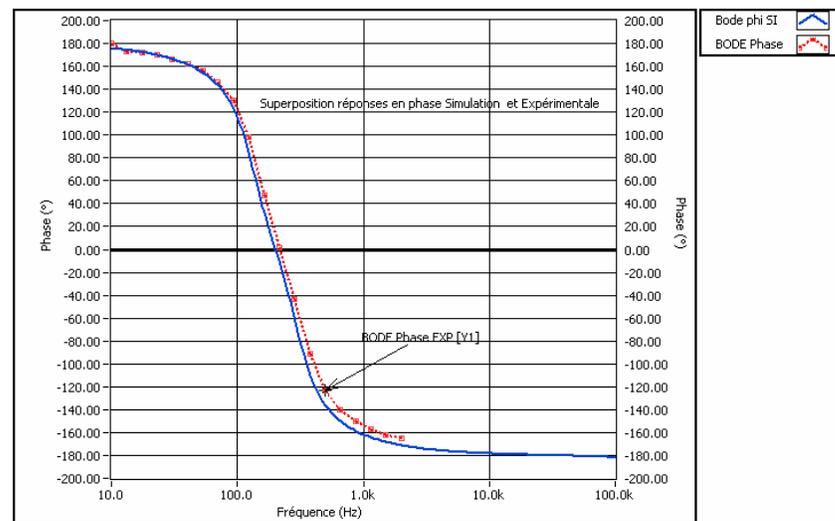


Pour comparer avec le gain obtenu en simulation, on mémorise puis on présente le graphe superposant les 2 courbes :



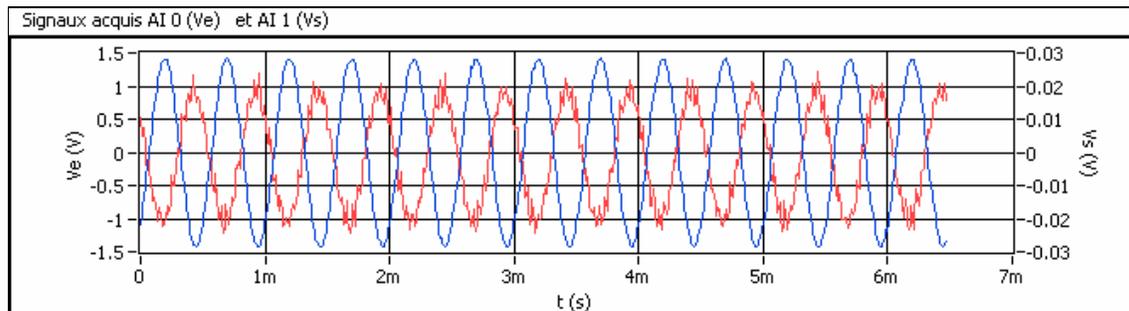
On note un petit décalage en fréquence au niveau de la partie basse : on l'explique par une tolérance sur un des composants, mais le comportement d'ensemble respecte le gabarit initial.

Graphes montrant le diagramme de Bode de la phase :



L'accord est satisfaisant.

La présente application permet des mesures sur des signaux réels, comportant des défauts importants dans les faibles niveaux, exemple pour la dernière valeur de fréquence :

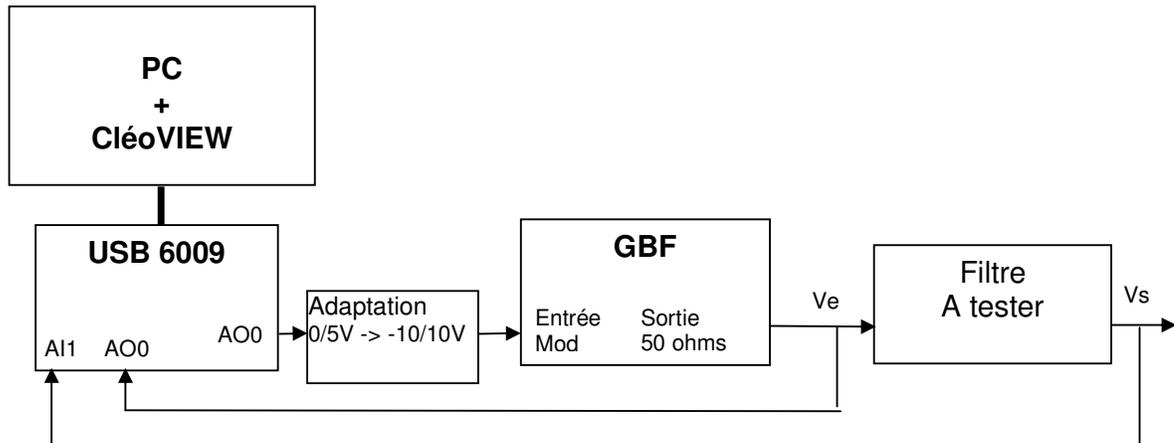


Les calculs doivent être suffisamment robustes pour en extraire gain et déphasage, et c'est pourquoi il faut acquérir plusieurs périodes.

La limitation en fréquence de cette application va tenir aux possibilités de génération et acquisition de la carte.

3.2) Etude en fréquence avec module USB6009 et GBF

Schéma du dispositif :

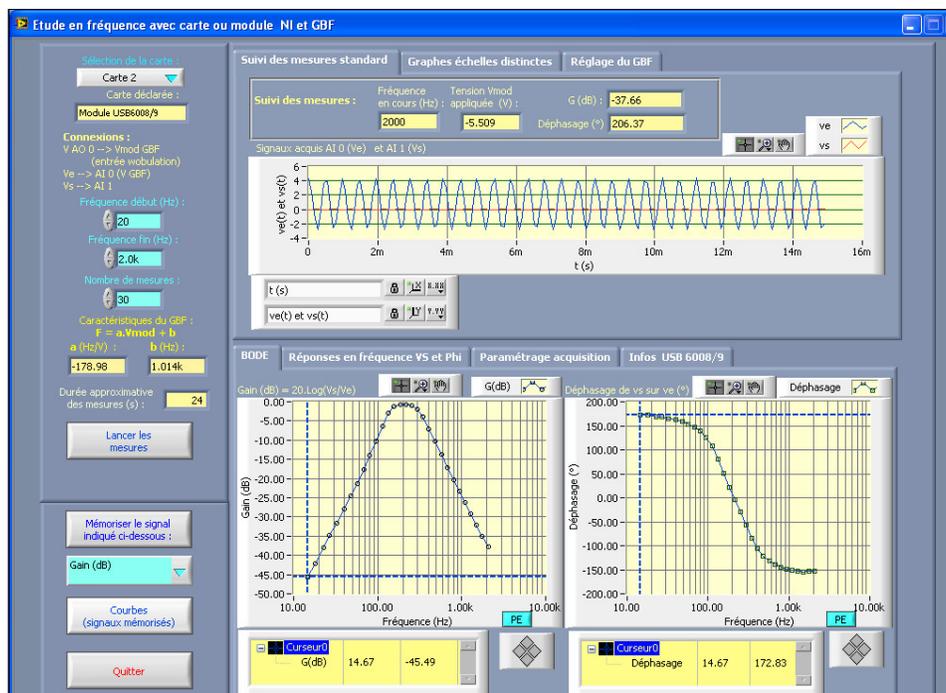


Les modules USB6008/9 ne pouvant générer de signaux sinusoïdaux aux fréquences nécessaires, on utilise le GBF via son entrée de modulation Vmod.

Un étage adaptateur de tension est nécessaire pour faire passer la sortie 0/5V de AO à -10/+10V.

Des pré réglages adaptés au GBF Métrix GX239 sont fournis : pour d'autres GBF il faut modifier les coefficients a et b de calibration ($F = a.V_{mod} + b$)

On peut alors obtenir une excursion de 2 décades environ, suffisant ici :



Les résultats sont comparables aux précédents.

Les réglages de la partie acquisition sont un peu plus délicats pour rentrer dans les performances du module :

BODE Réponses en fréquence VS et Phi Paramétrage acquisition Infos USB 6008/9

Les valeurs ci-dessous permettent d'ajuster les performances de la mesure : valeurs à adapter en fonction de la précision requise sur les graphes et des performances de la carte utilisée

Compte-rendu d'erreur suite à la dernière mesure :

sortie d'erreur

status code
 00

source

Calibres :
 AI-0 (Ve) : +/- 10
 AI-0 (Vs) : +/- 10
 Facteur multiplicatif de Vs : 1.000

Nombre de périodes à acquérir : 30
 Nombre de points total à acquérir : 170

Fréquence d'échantillonnage maximale demandée (Hz) : 22.667k
 F ech carte maximale (2 voies) (Hz) : 24k

Vmod min : -5.509
 Vmod max : 5.554

(F ech maxi = 2 * FreqFin * NBpoints / NbPériodes)

ATTENTION : Si cette valeur dépasse la fréquence maximale autorisée pour la carte utilisée, une erreur sera générée lors des mesures.

Délai d'attente (s) après l'actualisation de la fréquence GBF : 0.5

Tab Vmod (V)
 0 5.554 5.534 5.512 5.485

Tab Freq (Hz)
 0 20 23.442 27.476 32.205

Il faut se contenter de peu de points par période de signal acquis, quitte à augmenter le nombre de périodes acquises.

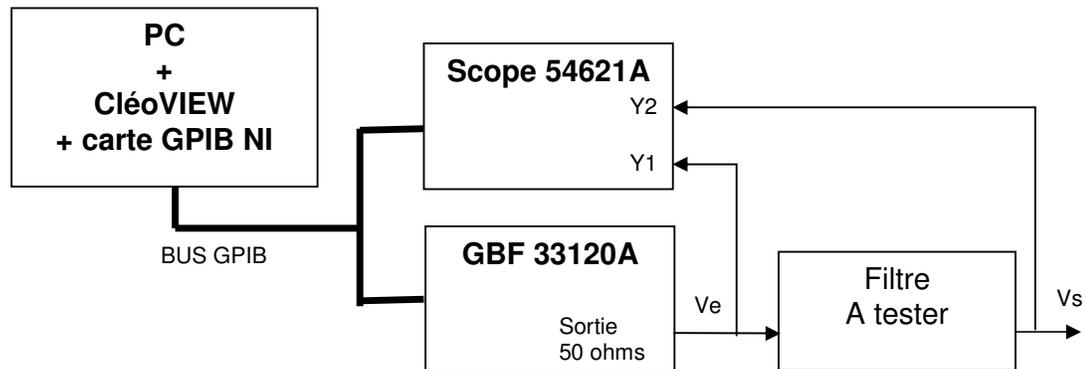
Par ailleurs il faut vérifier si la tension Vmod reste dans la gamme possible.

NB : l'indication Vmod tient compte de la présence du module d'adaptation en tension.

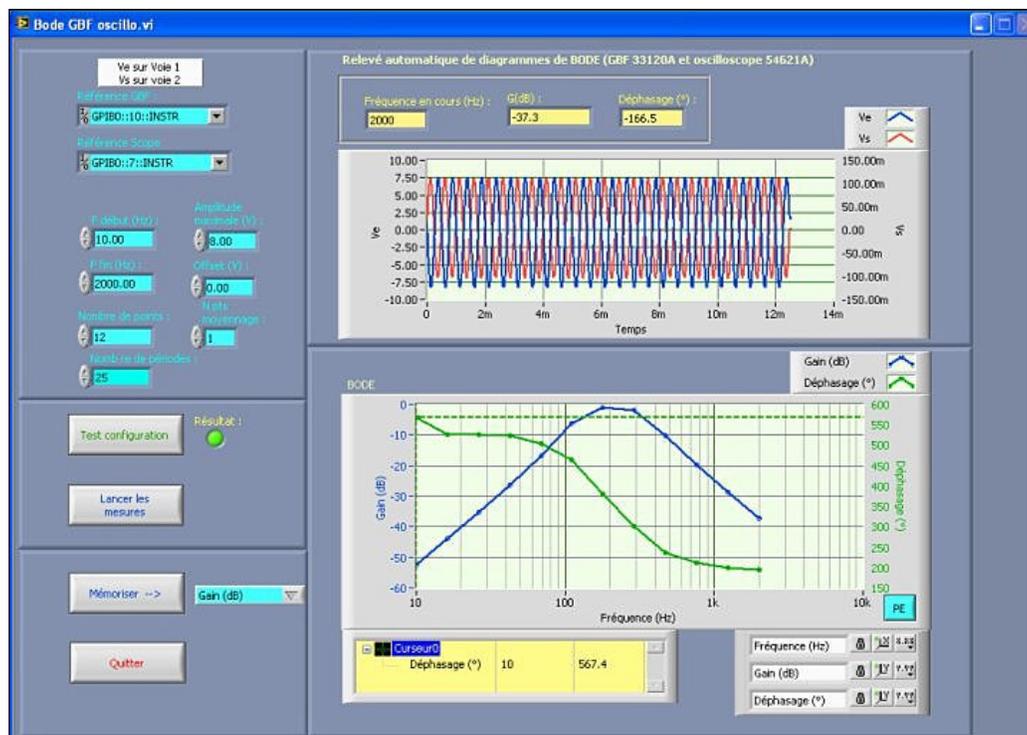
3.3) Etude en fréquence avec module GBF et Oscilloscope Agilent

En utilisant des appareillages de mesures communicants, les performances en terme de gamme de fréquence sont potentiellement plus importantes.

Schéma du dispositif avec appareils en GPIB :



L'utilisateur spécifie la gamme de mesure en fréquence, le nombre de moyennage (average de l'oscilloscope) et le nombre de périodes de signal à acquérir :



Les allures des tracés concordent très bien avec les précédents.
Pour la phase il faudra effectuer une soustraction de 360° aux valeurs.

4°) Conclusion

Il est toujours positif pour la maîtrise des connaissances de pouvoir confronter des résultats obtenus par des approches différentes, chacune ayant sa spécificité :

- ⇒ La théorie masque les défauts inévitables des composants (tolérances, non-linéarités, etc.),
- ⇒ la qualité d'une simulation est liée à la qualité des modèles utilisés, on a parfois quelques surprises,
- ⇒ les mesures s'appliquent au système réel, avec ses défauts de fabrication, et de plus les mesures comprennent toujours une part d'erreur.

Rassembler les 3 types de résultats comme le permet CleoVIEW, oblige à bien faire la part des choses.

Informations complémentaires sur CleoVIEW :

Site de la Société Cleode

<http://www.cleosys.fr/fr/produits.php?page=cleoview>

Téléchargement de la version de démonstration :

http://www.cleosys.fr/fr/telecharger.php?fichier=exe_cleoview.zip

Documentation sur le filtrage analogique :

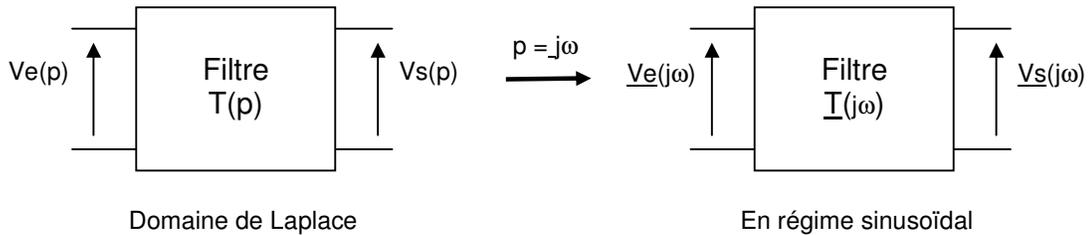
<http://tcts.fpms.ac.be/cours/1005-01b/filtanalog.pdf>

http://pagesperso-orange.fr/xcotton/electron/Synthese_de_filtre.pdf

http://sylvain.larribe.free.fr/CNAM/2004-2005/CNAM_2005_Filtrage.pdf

ANNEXE FILTRAGE : Définitions, types de filtres et fonctions

Définitions



Fonctions de transfert :

$$T(p) = V_s(p)/V_e(p)$$

$$\underline{I}(j\omega) = \underline{V}_s(j\omega)/\underline{V}_e(j\omega)$$

Gain et déphasage (en régime sinusoïdal) :

$$G(\text{dB}) = 20 \cdot \log(T) = 20 \cdot \log(V_s/V_e)$$

$$\phi = \arg(\underline{I})$$

Atténuation :

$$A(\text{dB}) = 20 \cdot \log(V_e/V_s) = -G$$

Temps de propagation de groupe :

$$t_g = -d(\phi)/d\omega$$

Diagrammes de Bode, résultats de l'étude en fréquence :

$$G(\text{dB}) = f(\text{fréquence}) \quad (\text{échelle log en } x, \text{ linéaire en } y)$$

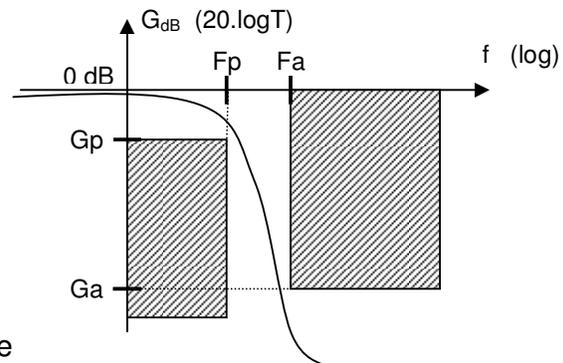
$$\phi (^{\circ}) = f(\text{fréquence})$$

Types de filtres

On spécifie un filtre en définissant un gabarit dans lequel doit rentrer le tracé du gain.

(Note : certains logiciels travaillent avec l'atténuation $A(\text{dB}) = -G(\text{dB})$)

Gabarit Passe-bas



Fp : fréquence passante
(limite supérieure de la bande passante)

Fa : fréquence atténuée
(limite inférieure de la BP)

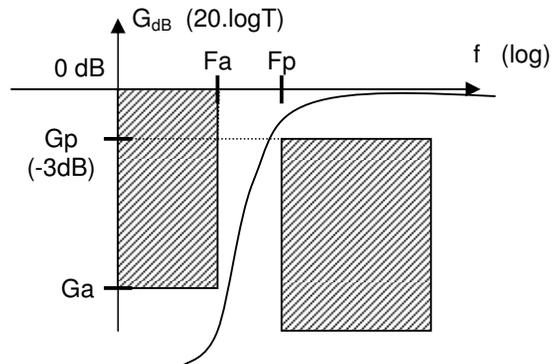
Gp : gain minimum dans la BP

Ga : gain maximum dans la bande atténuée

Dans la bande passante (de 0 à Fp), il faut que le gain soit supérieur à la valeur Gp indiquée.

La valeur usuelle de Gp est le plus souvent de -3dB et Fp est donc la fréquence de coupure à -3dB, c'est la valeur retenue pour CleoVIEW.

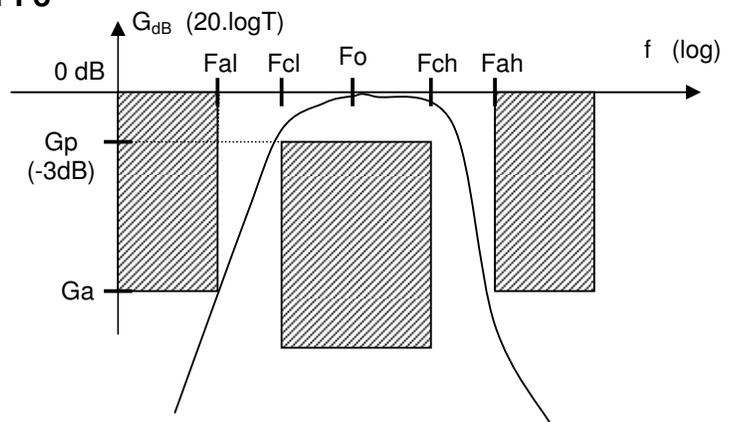
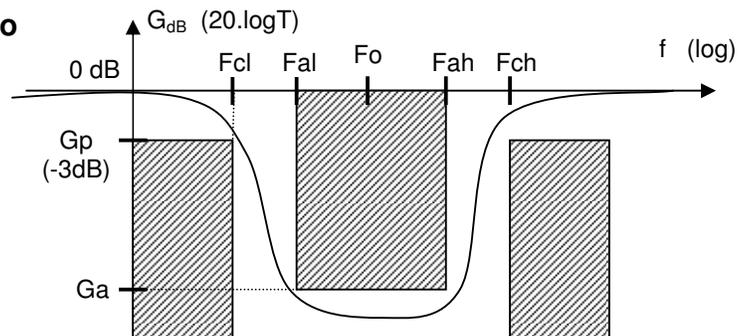
L'utilisateur a donc à indiquer les valeurs Fp, Fa et Ga : le logiciel détermine alors l'ordre du filtre nécessaire et les coefficients de la fonction de transfert, selon le choix du type de fonction (voir plus loin).

Gabarit Passe-hautEchange entre F_p et F_a **Passe-bande symétrique, centré sur F_o**

On note F_{cl} et F_{ch} les fréquences de coupure basse et haute (F_{pl} et F_{ph} à -3dB)

Pour le filtre centré sur F_o , on a :
 $\text{Log}(F_o) = (\text{log}(F_{cl}) + \text{log}(F_{ch})) / 2$

Soit $F_o = \sqrt{F_{cl} * F_{ch}}$

**Réjecteur symétrique, centré sur F_o** 

Concevoir un filtre se traduit donc par un choix du type de filtre puis la spécification des valeurs particulières liées à ce type (G_a , F_a , F_p , etc.), à compléter par le choix de la fonction d'approximation.

Types de fonctions

Pour chaque gabarit il existe une infinité de solutions respectant les contraintes
 Le logiciel fournit 3 types de fonctions avec chacune des propriétés spécifiques au niveau du gain, du déphasage ou du temps de propagation de groupe : Butterworth, Bessel et Chebychev.

Fonction générale :

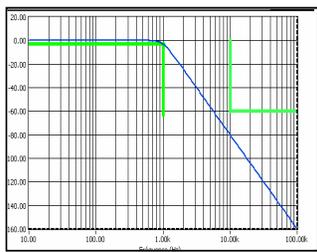
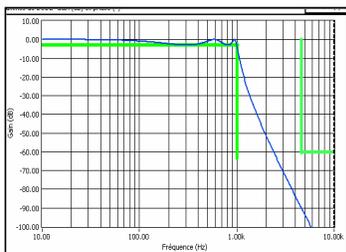
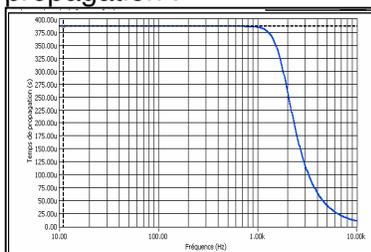
$$T(p) = \frac{N(p)}{D(p)} = \frac{1 + a_1 \cdot p + a_2 \cdot p^2 + \dots + a_m \cdot p^m}{1 + b_1 \cdot p + b_2 \cdot p^2 + \dots + b_n \cdot p^n}$$

avec $m < n$, n est l'ordre du filtre.

La fonction de transfert générale pourra être ramenée à un produit de fonction du 1^{er} ordre (si n impair) et du 2nd ordre.

Le réglage des coefficients du dénominateur est l'objet des différentes fonctions d'approximation, donnant des caractéristiques particulières.

Tableau de synthèse des différentes fonctions :

Butterworth	Chebychev	Bessel
« Maximally flat » : gain le plus constant dans la bande passante Bon temps de propagation de groupe	Ondulation dans la bande passante. Pente plus raide dans la zone de transition bande passante/bande atténuée Temps de propagation non constant dans la bande passante	Filtre optimisé pour le temps de propagation de groupe : filtre à phase linéaire Transition bande passante/bande atténuée + lente
$T^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \cdot u^{2n}}$ (pour un passe-bas) u : pulsation réduite $u = \omega / \omega_p$ n : ordre du filtre ε : amplitude de l'ondulation dans la BP $\varepsilon = 1$ si $G_p = -3dB$	$T^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \cdot T_{n(u)}^2}$ $T_{n(u)}$: polynôme de Chebychev $T_{n(u)} = \cos(n \cdot \arccos(u))$ pour $u \leq 1$ Ou formule de récurrence : $T_0 = 1$ $T_1 = u$ $T_{n+1} = 2 \cdot u \cdot T_n - T_{n-1}$	Pas de formule générique pour le module. Polynômes de Bessel à calculer par une formule de récurrence
Allure du gain : 	Allure du gain : 	Allure du temps de propagation : 
Gain constant dans la BP	Ondulation dans la BP	Temps de propagation constant dans la BP

Les schémas fournis par CleoVIEW en sortie de conception sont constitués d'une association en cascade de cellules d'ordre 1 et d'ordre 2 selon l'ordre n calculé.

<p>Passé-bas : Sallen-Key</p> $\omega = \frac{1}{RC}$ $A = 1 \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad Q = \frac{\sqrt{R_2 C_1}}{1 + \frac{R_2}{R_1}} = 1/2m$	
<p>ORDRE 1</p>	<p>ORDRE 2</p>
<p>Passé-haut : Sallen-Key (mêmes expressions A, ω_p et Q)</p>	
<p>ORDRE 1</p>	<p>ORDRE 2</p>
<p>Passé-bande : Rauch (MFB : multiFeedBack)</p> $A = -\frac{R_3}{2.R_1} \quad \omega_0 = \frac{1}{C} \cdot \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1.R_2.R_3}}$ $m = \sqrt{\frac{R_1.R_2}{R_3.(R_1 + R_2)}}$	
<p>Réjecteur :</p> $A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad m = 2 - A \quad \omega = \frac{1}{RC}$	

**Fonctions de transfert des cellules élémentaires d'ordre 1 et 2
en régime sinusoïdal ($p=j\omega$)**

Passe-bas	Ordre 1 $T_{1LP}(j\omega) = \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_0}}$	Ordre 2 $T_{2LP}(j\omega) = \frac{A}{1 + 2m \frac{j\omega}{\omega_0} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}$
Passe-haut	Ordre 1 $T_{1HP}(j\omega) = \frac{j\omega}{\omega_0 + j\omega}$	Ordre 2 $T_{2HP}(j\omega) = \frac{-\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \cdot A}{1 + 2m \frac{j\omega}{\omega_0} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}$
Passe-bande	$T_{BP}(j\omega) = \frac{A * 2m \frac{j\omega}{\omega_0}}{1 + 2m \frac{j\omega}{\omega_0} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}$	
Réjecteur	$T_N(j\omega) = \frac{A \cdot (1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2})}{1 + 2m \frac{j\omega}{\omega_0} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} \quad (\text{ici } \omega_z = \omega_0)$	

LP : Low Pass
 HP : High Pass
 BP : Band Pass
 N : Notch