

N° :

Prénom :

NOM :

**B.T.S. ÉLECTRONIQUE**  
**Session 1999**

**ÉPREUVE DE**  
**PHYSIQUE APPLIQUÉE**

**(durée : 4 h ; coefficient : 5)**

**Les candidats répondront aux questions posées sur le texte même de l'épreuve qu'ils inclueront dans une copie double à remettre aux surveillants en quittant la salle d'examen.**

*Le sujet comporte 17 pages mais c'est la place réservée aux réponses dans le corps de l'épreuve qui conduit à ce nombre important. La longueur réelle de l'épreuve, qui tient en 10 pages très aérées, est sans commune mesure avec ce nombre de pages.*

---

*L'épreuve comporte trois parties :*

- 1 - Étude d'un filtre ;*
- 2 - Étude générale d'une boucle à verrouillage de phase ;*
- 3 - Étude du comparateur de phase de la boucle.*

*Ces trois parties sont indépendantes même si on utilise, dans la troisième partie, des définitions ou des figures données dans la deuxième partie.*

---

*Lors des applications numériques, les résultats seront donnés avec deux ou trois chiffres significatifs.*

---

## 1 - ÉTUDE D'UN FILTRE

---

### PRÉSENTATION :

En sortie du synthétiseur de parole de la carte principale (Main Board) du dispositif étudié, se trouve un filtre dont le schéma structurel est donné à la figure 1-1, page 5. Ce filtre est construit autour de trois amplificateurs opérationnels (AO) supposés parfaits. La tension d'entrée du filtre est  $e(t)$  et celle de sortie est  $s(t)$ .

Le but de cette étude est de déterminer la transmittance, isomorphe ou isochrone, du filtre sans faire de calcul complet sur le schéma.

Un système automatique de mesures a permis de relever :

- la réponse indicielle (figure 1-2) du filtre quand la tension  $e(t)$  passe de 0,0 V à 1,0 V à l'instant origine ;
- la réponse fréquentielle du filtre dans la représentation de Bode avec la courbe de gain (figure 1-3, page 6) et la courbe de phase (figure 1-4).

### STABILITÉ DU FONCTIONNEMENT LINÉAIRE DU FILTRE :

Q 1-1 : Pour le régime continu, dessiner le schéma simplifié du filtre autour de AO1 et montrer que cet amplificateur a bien une contre - réaction.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Q 1-2 : En déduire l'amplification du filtre en continu.

.....

.....

.....

Q 1-3 : À partir de la réponse indicielle, donner un élément graphique permettant de confirmer la stabilité du fonctionnement linéaire du filtre.

.....

.....

.....

Q 1-13 : En déduire la valeur numérique approchée du paramètre manquant de  $\underline{T}(j.\omega)$ .

.....  
.....  
.....

Q 1-14 : Montrer qu'il existe un phénomène de résonance qui sera clairement entouré sur la représentation de Bode.

UTILISATION DE LA RÉPONSE INDICIELLE :

Q 1-15 : Donner des éléments de la courbe de réponse indicielle qui permettent de conforter la réponse donnée à la question Q 1-4 sur la nature du filtre.

.....  
.....  
.....  
.....

Q 1-16 : Quel est l'élément de la courbe de réponse indicielle qui permet de conforter la réponse donnée à la question Q 1-5 sur la valeur de  $\underline{T}(j.\omega)$  pour  $\omega = 0$  ?

.....  
.....  
.....

Q 1-17 : Entourer, sur la figure 1-2, les éléments de la courbe de réponse indicielle qui permettent de dire que l'ordre du filtre est plus grand que 1.

Q 1-18 : Sur la courbe de réponse indicielle, définir graphiquement la pseudo-période ( $T_p$ ) et le premier dépassement relatif ( $d$  en %). Estimer l'ordre de grandeur de ces deux paramètres.

.....  
.....  
.....

Q 1-19 : Donner des éléments de réponse permettant de conforter l'accord, s'il existe, entre l'ordre de grandeur de ces deux derniers paramètres et l'ordre de grandeur des paramètres de  $\underline{T}(j.\omega)$  de la question Q 1-13.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

UTILISATION DE LA RÉPONSE FRÉQUENTIELLE :

Q 1-4 : Avec la courbe de gain, donner la nature du filtre en justifiant la réponse.

.....  
.....

Q 1-5 : Avec les courbes de gain et de phase, donner la transmittance isochrone  $\underline{T}(j,\omega)$  pour la pulsation  $\omega$  nulle.

.....  
.....

Q 1-6 : Tracer l'asymptote oblique à la courbe de gain. Déterminer sa pente et les coordonnées de son point d'intersection avec l'asymptote horizontale à la courbe de gain. Répondre sur la figure 1-3.

Q 1-7 : En déduire l'ordre minimal du filtre.

.....  
.....

Q 1-8 : Tracer le diagramme asymptotique de la courbe de phase. Répondre sur la figure 1-4.

Q 1-9 : Donner un élément graphique de la courbe de phase permettant de confirmer que l'ordre minimal trouvé précédemment est l'ordre du filtre.

.....  
.....  
.....

Q 1-10 : En utilisant les éléments de réponses précédentes, donner l'expression générale d'une transmittance isochrone  $\underline{T}(j,\omega)$  possible du filtre en ne faisant apparaître que deux paramètres dont il reste à déterminer les valeurs numériques.

.....  
.....  
.....  
.....

Q 1-11 : Déterminer graphiquement la fréquence  $f_0$  permettant d'avoir  $\underline{T}(j,\omega)$  purement imaginaire. Calculer numériquement la pulsation  $\omega_0$  correspondante.

.....  
.....  
.....

Q 1-12 : Quelle est la valeur du gain pour cette pulsation  $\omega_0$  ?

.....  
.....

FIGURE 1-1 : SCHÉMA STRUCTUREL DU FILTRE

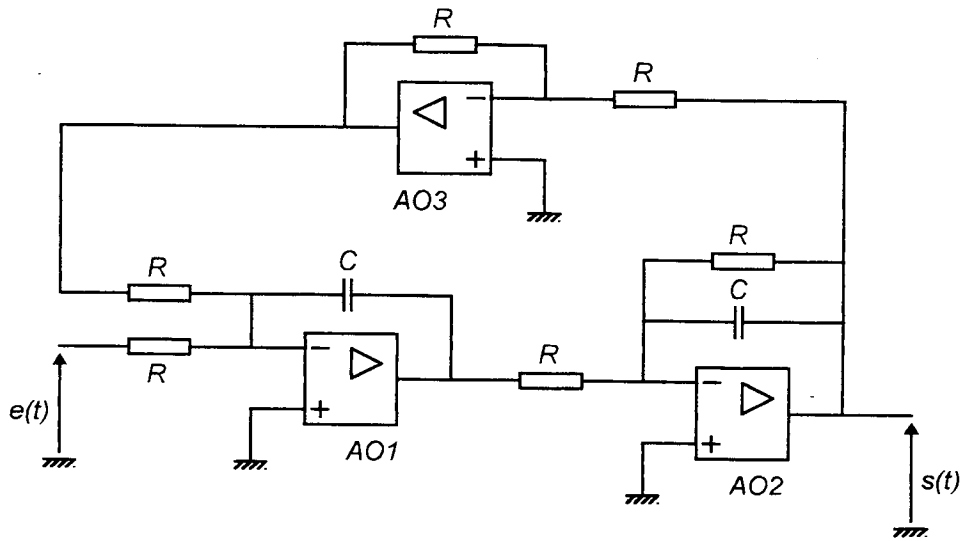


FIGURE 1-2 : RÉPONSE INDICIELLE DU FILTRE

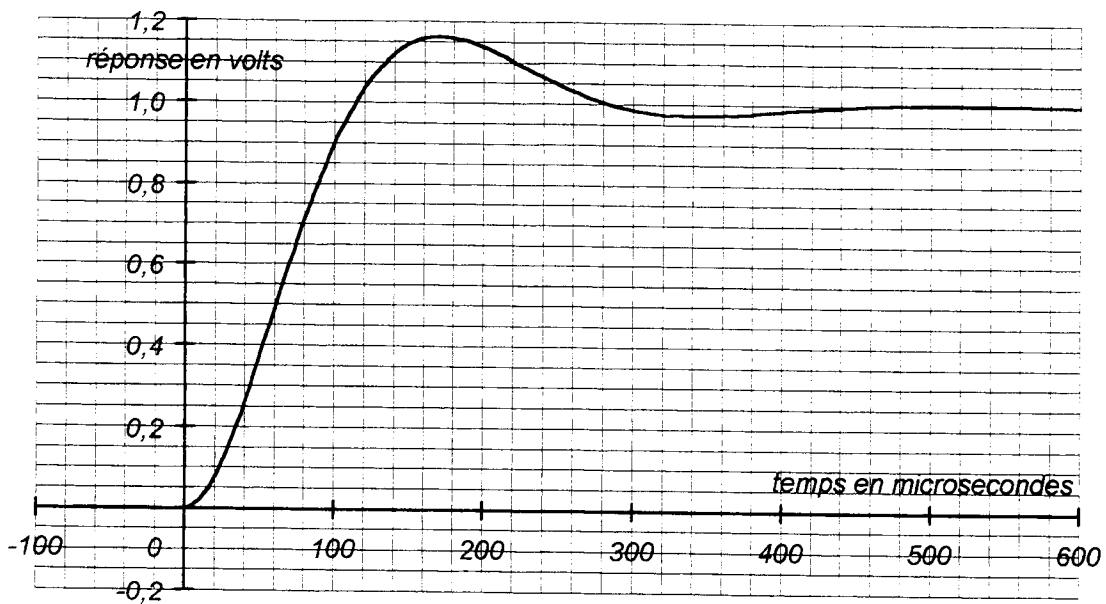


FIGURE 1-3 : COURBE DE GAIN

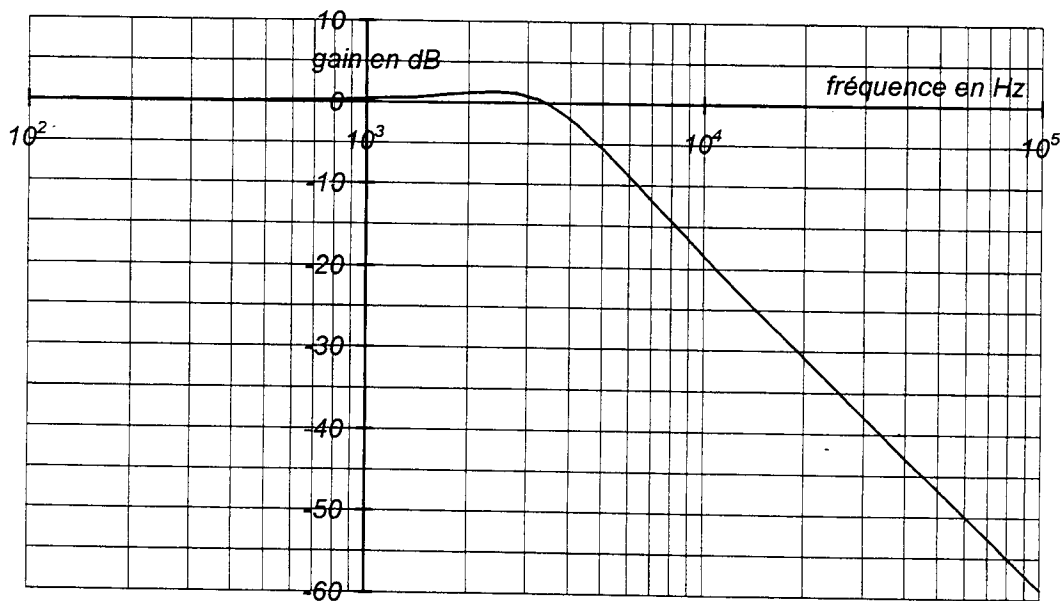
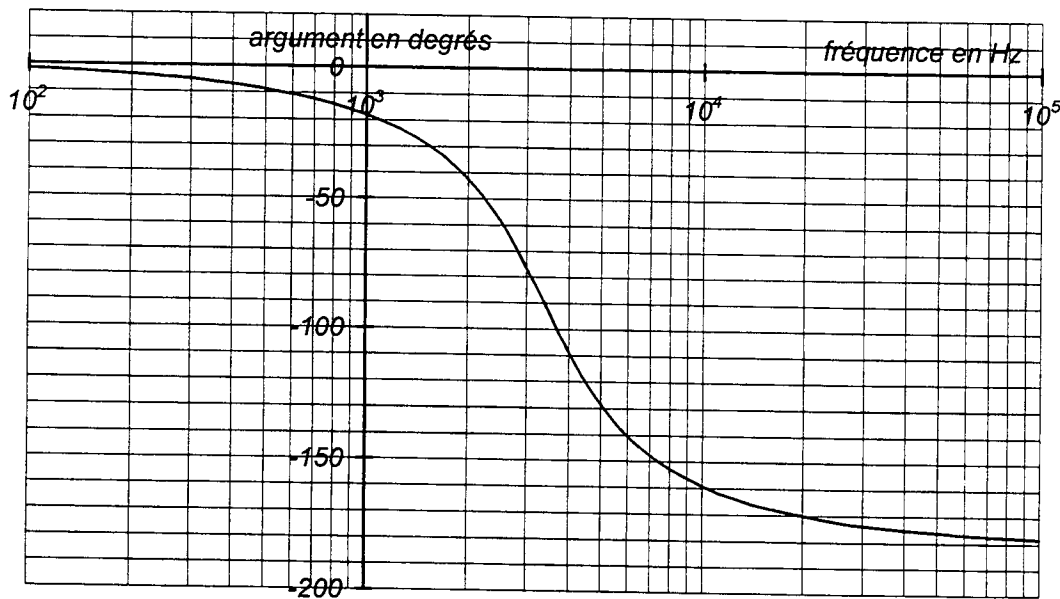


FIGURE 1-4 : COURBE DE PHASE



## 2 - ÉTUDE D'UNE BOUCLE À VERROUILLAGE DE PHASE

### PRÉSENTATION :

Une boucle à verrouillage de phase est insérée dans la partie "interface ligne téléphonique" du système étudié. Elle permet de savoir s'il y a appel téléphonique par détection d'une fréquence "musicale" de 330 Hz ou de 440 Hz (tonalité). Cette boucle est organisée autour du circuit intégré CMOS 4046 associé à un filtre passe-bas. Le circuit 4046 comporte deux éléments essentiels pour la boucle :

- un comparateur de phase ;
- un oscillateur commandé par une tension (V.C.O.).

Le schéma de la boucle complète est donné à la figure 2-1, page 14. Le circuit intégré 4046 est alimenté sous la tension  $V_0$  égale à 5,0 V.

Dans cette partie, on n'envisage pas le cas correspondant à une absence de tonalité ( $e_M(t) = C^{ste}$ ) ; on suppose que le signal  $e_M(t)$  devient porteur de l'une ou l'autre des deux tonalités : par modulation "FSK", la fréquence de  $e_M(t)$  prend brusquement soit la valeur 330 Hz, soit la valeur 440 Hz. La tension  $e_M(t)$  est donc le signal d'entrée de la boucle et porte l'information par sa fréquence  $f_M(t)$ .

Les tensions  $e_M(t)$  et  $e_R(t)$  sont deux tensions rectangulaires dont on suppose le rapport cyclique égal à  $\frac{1}{2}$  ; leur valeur est égale à  $V_0$  ou bien elle est nulle. Lorsque la boucle est verrouillée, en régime permanent, la tension  $e_R(t)$  est égale à  $e_M(t)$  :

- elle a même forme (rectangulaire de rapport cyclique  $\frac{1}{2}$ ) ;
- son amplitude est la même (sa valeur est soit 0 V, soit  $V_0$ ) ;
- sa fréquence instantanée  $f_R(t)$  est égale à  $f_M(t)$  ;
- sa phase instantanée  $\varphi_R(t)$  est égale à celle de  $e_M(t)$ , notée  $\varphi_M(t)$ .

On rappelle que la phase instantanée d'un signal périodique rectangulaire est la phase de son fondamental à l'instant  $t$ , donc, en choisissant  $t_0$  comme instant de référence :

$$\varphi_M(t) = \varphi_M(t_0) + 2 \cdot \pi \cdot \int_{t_0}^t f_M(\theta) \cdot d\theta \quad \text{et} \quad \varphi_R(t) = \varphi_R(t_0) + 2 \cdot \pi \cdot \int_{t_0}^t f_R(\theta) \cdot d\theta$$

De plus, prenant la référence des phases sur  $\varphi_M(t)$ , on pose :  $\varphi_M(t_0) = 0$ .

Nous admettons, dans cette partie, que la logique interne au 4046 et le filtre associé R-C, dont le schéma est donné à la figure 2-2, page 14, élaborent tout d'abord la différence des phases  $\varphi_D(t) = \varphi_M(t) - \varphi_R(t)$  puis permettent d'obtenir, à partir de  $\varphi_D(t)$ , la tension  $e_D(t)$  suivante :

$$e_D(t) = e_D(t_0) + \frac{V_0}{4 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \cdot \int_{t_0}^t \varphi_D(\theta) \cdot d\theta \quad \text{(Cette relation sera notée } \mathcal{R} \text{).}$$

Enfin la fréquence  $f_R(t)$  de la tension  $e_R(t)$ , fournie par l'oscillateur "V.C.O.", est réglée par  $e_D(t)$  : quand  $e_D$  varie de 0 V à  $V_0$ ,  $f_R$  varie de  $f_{min}$  à  $f_{max}$  comme l'indique la figure 2-3.

La fréquence centrale de l'oscillateur "V.C.O." est notée  $f_{R0}$  :  $f_{R0} = f_{min} + f_L$

RÉDUCTION DE SCHÉMA :

Q 2-1 : À partir de la courbe donnant le fonctionnement de l'oscillateur "V.C.O.", exprimer la fréquence  $f_R$  en fonction de  $e_D$  et des paramètres  $f_{min}$ ,  $f_L$  et  $V_0$  lorsque comme sur la figure 2-3, la tension  $e_D$  varie entre 0 et  $V_0$ .

.....  
.....  
.....  
.....

Q 2-2 : Sur la figure 2-4, page 15, compléter les parties aboutissant au som-mateur élaborant la fréquence  $f_R(t)$ .

Q 2-3 : La fréquence  $f_M(t)$ , grandeur à détecter, est placée en entrée de la boucle de la figure 2-4. Que faut-il placer dans le bloc élaborant  $\varphi_M(t)$  à partir de  $f_M(t)$  ? Répondre sur la figure 2-4.

Q 2-4 : On suppose qu'à l'instant  $t_0$ , choisi comme origine des temps, la bou-cle verrouillée fonctionne en régime permanent avec une fréquence  $f_M$  égale à  $f_{R0}$ , fréquence centrale de l'oscillateur "V.C.O."

Que valent  $\varphi_R(t_0)$ ,  $\varphi_D(t_0)$  et  $e_D(t_0)$  ?

.....  
.....  
.....

Remarque : ces conditions initiales seront maintenues jusqu'à la fin du problème.

Q 2-5 : Avec les conditions précédentes, la figure 2-4 peut être simplifiée en la figure 2-5. Que faut-il mettre dans le bloc situé juste après le comparateur d'entrée ? Répondre sur la figure 2-5.

Q 2-6 : On peut encore simplifier la boucle précédente et la rendre conforme à celle de la figure 2-6. Préciser sur la figure 2-6 ce que doit être la grandeur d'entrée de cette dernière boucle.

ÉTUDE DE LA STABILITÉ DU FONCTIONNEMENT DE LA BOUCLE :

À la variation  $(f_M(t) - f_{R0})$  de la grandeur d'entrée, nous faisons correspondre sa transformée de Laplace  $F_M(p)$ .

De même, à la variation  $(f_R(t) - f_{R0})$ , nous faisons correspondre la transformée de Laplace  $F_R(p)$ , et à  $\varphi_D(t)$ , sa transformée  $\Phi_D(p)$ .



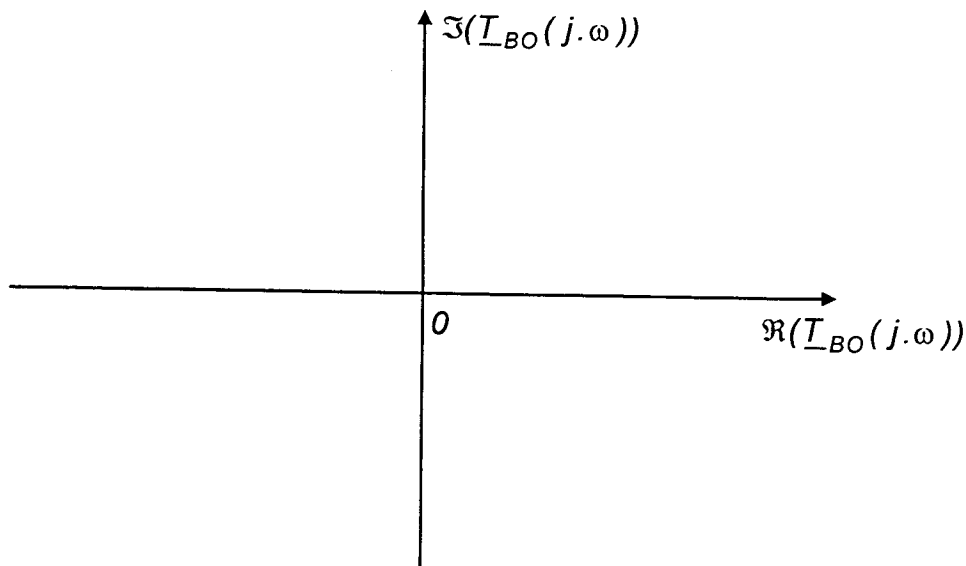
Q 2-7 : Que faut-il alors placer dans le bloc fonctionnel liant  $F_R(p)$  à  $\Phi_D(p)$  de la figure 2-7, page 16 ? Répondre sur la figure 2-7.

Q 2-8 : La figure 2-8 présente le schéma de boucle le plus réduit possible. Que faut-il placer dans le bloc fonctionnel ? Répondre sur la figure 2-8.

Q 2-9 : Donner l'expression de la transmittance isomorphe  $T_{BO}(p)$  de la boucle ouverte de la figure 2-8 et celle de sa transmittance isochrone  $\underline{T}_{BO}(j.\omega)$ .

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

Q 2-10 : Tracer le diagramme de Nyquist relatif à  $\underline{T}_{BO}(j.\omega)$ .



Q 2-11 : Rappeler l'énoncé du critère du revers de Nyquist.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

Q 2-12 : Déterminer alors si le modèle de la boucle ouverte offre un fonctionnement stable en boucle fermée.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

Q 2-13 : À partir de la figure 2-8, calculer la transmittance isomorphe  $T_{BF}(p)$  en boucle fermée.

.....  
.....  
.....

Q 2-14 : Montrer que le résultat de la question Q 2-12 est cohérent avec celui de la question précédente Q 2-13.

.....  
.....  
.....

AMÉLIORATION DE LA STABILITÉ DE LA BOUCLE :

Le fonctionnement réel de la boucle à verrouillage de phase, avec le filtre R-C de la figure 2-2, n'est pas instable. Ceci est dû au fait que la relation  $\mathcal{R}$  donnée dans la présentation de la boucle (bas de la page 7) n'est qu'une relation approchée qui en simplifie l'analyse. Ce fonctionnement est toutefois très fortement oscillatoire.

Nous continuons à utiliser le modèle simplifié de la boucle à verrouillage de phase pour expliquer l'amélioration de la stabilité avec le remplacement du filtre passe-bas de la figure 2-2, page 14, par celui de la figure 2-9, page 16.

Avec le nouveau filtre, la tension  $e_D(t)$  appliquée à l'oscillateur "V.C.O." est prise aux bornes d'un dipôle constitué par la mise en série de C et de la portion  $\alpha.R$  de la résistance R (R et C ont les mêmes valeurs pour les deux filtres). De ce fait, on admet que la transmittance isochrone de la boucle ouverte qui était égale à  $\underline{T}_{BO}(j.\omega)$  avec le filtre R-C initial devient égale à  $\underline{T}_{BOC}(j.\omega)$  avec le filtre corrigé :

$$\underline{T}_{BOC}(j.\omega) = -f_L \cdot \frac{1 + j.\alpha.R.C.\omega}{R.C.\omega^2}$$

Q 2-15 : Donner la transmittance isochrone  $\underline{T}(j.\omega)$  du filtre R-C de la figure 2-2 et la transmittance isochrone  $\underline{T}_C(j.\omega)$  du filtre corrigé. Calculer le rapport  $\underline{T}_C(j.\omega) / \underline{T}(j.\omega)$  et expliquer pourquoi le changement de filtre transforme la transmittance  $\underline{T}_{BO}$  de la question 2-9 en  $\underline{T}_{BOC}$  donnée ci-dessus.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

Q 2-16 : À partir de l'expression de  $T_{BOC}(p)$ , faire apparaître la transmittance isomorphe  $C(p)$  d'un correcteur dans le bloc vide de la figure 2-10 ; celle-ci représentant le schéma de la nouvelle boucle dans lequel  $T_{BO}(p)$  est toujours l'expression établie à la question Q 2-8.

Q 2-17 : Donner le type du correcteur de transmittance  $C(p)$  équivalent au changement de filtre ; par exemple : à action proportionnelle ; à actions proportionnelle et intégrale ; à actions proportionnelle, intégrale et dérivée ; etc.

.....  
.....

Q 2-18 : Calculer la transmittance isomorphe  $T_{BFC}(p)$  de la boucle fermée corrigée. Quel est l'intérêt de la correction effectuée ?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

---

### 3 - ÉTUDE DU COMPAREUR DE PHASE

---

Lorsque le circuit intégré 4046 fonctionne avec le filtre R-C de la figure 2-2, nous avons admis dans la partie précédente que la relation  $\mathcal{R}$  du bas de la page 7 établissait la relation entre  $e_D(t)$  et  $e_R(t)$ . Dans cette troisième partie, nous nous proposons de montrer que  $\mathcal{R}$  n'est qu'une relation approchée. Ceci explique les différences entre le fonctionnement de la boucle réelle et celui qu'implique le modèle simplifié précédent.

La figure 3-1, page 17, donne un exemple de signaux  $e_M(t)$  et  $e_R(t)$  dans lequel  $e_M(t)$  est en avance d'une durée  $t_d$  sur  $e_R(t)$  ; c'est le seul cas qui sera étudié car l'autre, où  $e_M(t)$  serait en retard sur  $e_R(t)$ , donnerait des résultats en tous points analogues.

À partir des signaux  $e_D(t)$  et  $e_R(t)$ , on peut considérer que le circuit 4046 élabore les signaux logiques  $k_1(t)$  et  $k_2(t)$  qui sont représentés sur la figure 3-1.

La tension  $e_D(t)$ , appliquée à l'entrée de l'oscillateur "V.C.O.", est alors celle que l'on trouve aux bornes du condensateur de capacité C de la figure 3-2 :

- lorsque  $k_1 = 1$  et  $k_2 = 0$  : l'interrupteur  $K_1$  est fermé,  $K_2$  est ouvert et la tension  $V_0$  est appliquée au dipôle R-C ;
- lorsque  $k_1 = 0$  et  $k_2 = 1$  :  $K_1$  est ouvert,  $K_2$  est fermé, le dipôle R-C est en court-circuit ;
- lorsque  $k_1 = k_2 = 0$  :  $K_1$  et  $K_2$  sont ouverts (état de haute impédance).

On prendra :  $R = 47 \text{ k}\Omega$  ;  $C = 0,22 \text{ }\mu\text{F}$  ;  $V_0 = 5,00 \text{ V}$  ;  $f_{\min} = 280 \text{ Hz}$  ;  $f_{\max} = 480 \text{ Hz}$  ; voir la figure 2-3.

On suppose, dans un premier temps, que la fréquence  $f_M$  de  $e_M(t)$  est égale à la fréquence centrale  $f_{R0} = 380$  Hz de l'oscillateur "V.C.O."

A l'instant  $t = 0$ , la tension  $e_D(0)$  aux bornes de C est égale à  $\frac{V_0}{2} = 2,50$  V, ce qui entraîne, pour la tension  $e_R(t)$ , la fréquence  $f_R = f_M = f_{R0} = 380$  Hz.

L'avance initiale de  $e_M(t)$  par rapport à  $e_R(t)$  est égale à  $t_d = 0,26$  ms.

Q 3-1 : On admet que de  $t = 0$  à  $t = T$ , intervalle de temps étudié, les variations de la tension  $e_D(t)$  sont faibles devant  $V_0$  : le courant  $i(t)$  qui parcourt la résistance R de la figure 3-1, lorsqu'il existe, peut donc être considéré comme constant et égal à sa valeur initiale  $i(0)$  ; la période  $T_R$  de  $e_R(t)$  peut également être considérée comme constante et égale à la période  $T_M = T$  de  $e_M(t)$ .

Exprimer  $i(0)$  en fonction de  $V_0$  et de R. Quelle est la charge  $\delta q$  stockée par le condensateur pendant une période T. En déduire l'expression de la variation  $\delta e_D$  de la tension  $e_D$  sur la période T, en fonction de R, C,  $V_0$  et  $t_d$ . Application numérique : calculer  $\delta e_D$ .

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

Q 3-2 : Dessiner l'allure de  $e_D(t)$  au bas de la figure 3-1 (pour plus de clarté, on pourra exagérer la variation  $\delta e_D$  par rapport à  $V_0/2$ ).

Q 3-3 : Exprimer la différence de phase  $\varphi_D = \omega \cdot t_d$ , en radians, en fonction de T et de  $t_d$ .

.....  
.....

Q 3-4 : En utilisant les approximations de la question 3-1 ( $\varphi_D = C^{ste}$  de 0 à T), donner, sur cet intervalle de temps, l'expression littérale de  $e_{Dth}(t)$  fournie par la relation R de la page 7. Exprimer la variation  $\delta e_{Dth}$  de  $e_{Dth}$  sur une période T en fonction de R, C,  $V_0$  et  $t_d$ .

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

Q 3-5 : Comparer  $\delta e_{Dth}$  et  $\delta e_D$ .

.....  
.....

Q 3-6 : Représenter graphiquement  $e_{Dth}(t)$  sur la figure 3.1.

Q 3-7 : **Conclusion sur le cas où  $e_D$  est proche de  $\frac{V_0}{2}$ .**

Qualifier l'approximation qui consiste à remplacer la fonction  $e_D(t)$  par la fonction  $e_{Dth}(t)$  tirée de  $\mathcal{R}$  en choisissant l'une des phrases suivantes (rayer alors les deux autres), ou en donnant une réponse différente (rayer alors les phrases a, b et c).

- a) elle consiste à remplacer  $e_D(t)$  par son premier harmonique
- b) c'est une simple linéarisation sur une période
- c) elle est mauvaise car, après une période de  $e_M(t)$ , les variations de  $e_{Dth}(t)$  et de  $e_D(t)$  sont différentes.

.....  
.....  
.....

On suppose maintenant que la tension  $e_M(t)$  a pour fréquence  $f_M = 330$  Hz et que la boucle est verrouillée :  $e_D(0) = \frac{V_0}{4} = 1,25$  V.

À partir de cet état, une perturbation entraîne une différence de phase  $\varphi_D > 0$  entre  $e_M(t)$  et  $e_R(t)$  :  $e_M(t)$  est en avance sur  $e_R(t)$  d'une durée  $t_d$ .

Q 3-8 : Calculer le courant  $i$  (supposé constant) qui parcourt la résistance  $R$  de la figure 3-2 lorsque l'interrupteur  $K_1$  est fermé pour  $t > 0$ .

.....  
.....

Q 3-9 : En déduire la variation  $\delta e_D$  de  $e_D$  sur la période  $T$ . Application numérique avec  $t_d = 0,26$  ms.

.....  
.....  
.....  
.....

Q 3-10 : Montrer que pour  $t_d = 0,26$  ms, la variation  $\delta e_{Dth}$  de  $e_{Dth}$  sur une période  $T$ , calculée à partir de  $\mathcal{R}$ , a la même valeur qu'à la question 3-4.

Q 3-11 : **Conclusion sur le cas où  $e_D$  est différente de  $\frac{V_0}{2}$ .**

Qualifier l'approximation qui consiste à remplacer la fonction  $e_D(t)$  par la fonction  $e_{Dth}(t)$  tirée de  $\mathcal{R}$  en choisissant l'une des phrases suivantes (rayer les deux autres), ou en donnant une réponse différente (rayer alors les phrases a, b et c).

- c) elle consiste à remplacer  $e_D(t)$  par son premier harmonique
- d) c'est une simple linéarisation sur une période
- c) elle est mauvaise car, après une période de  $e_M(t)$ , les variations de  $e_{Dth}(t)$  et de  $e_D(t)$  sont différentes.

.....  
.....

FIGURE 2-1 : BOUCLE COMPLÈTE

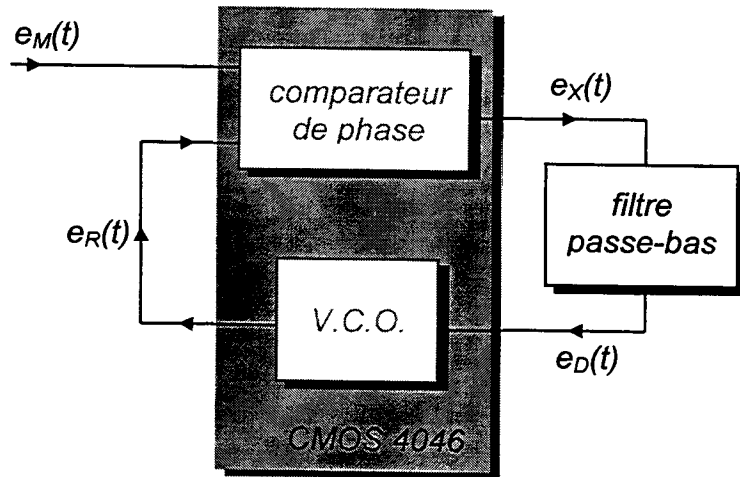


FIGURE 2-2 : FILTRE R-C

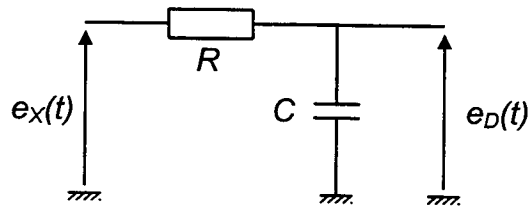


FIGURE 2-3 : CARACTÉRISTIQUE DE L'OSCILLATEUR "V.C.O."

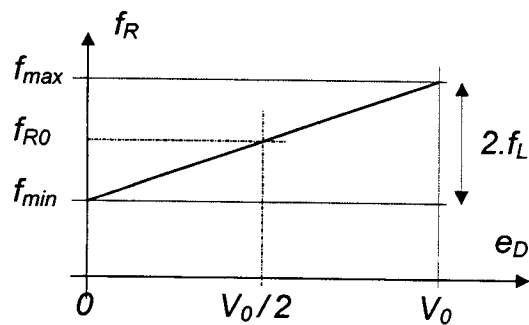


FIGURE 2-4 :

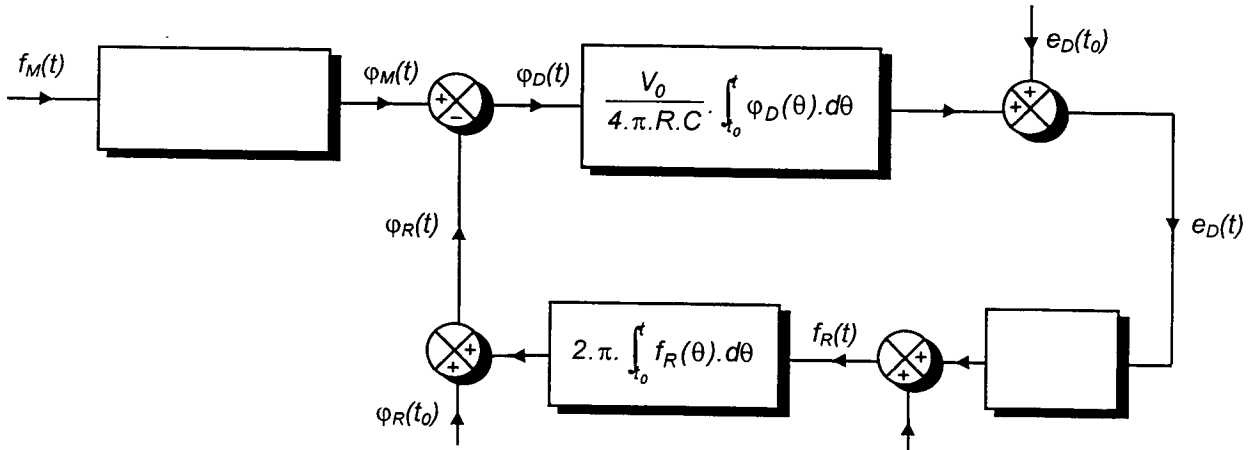


FIGURE 2-5 :

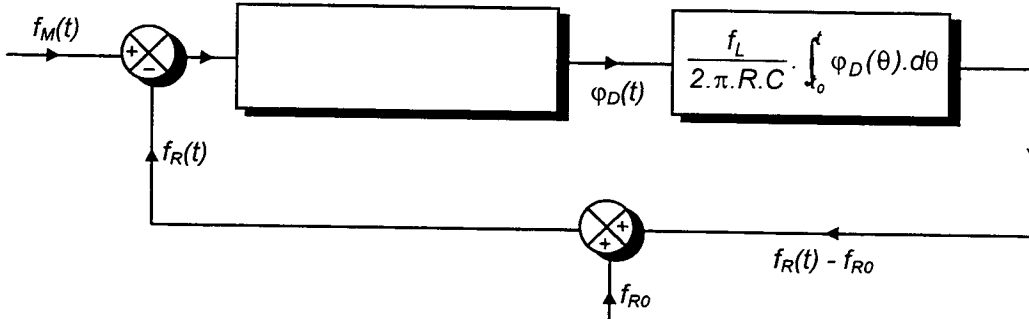


FIGURE 2-6 :

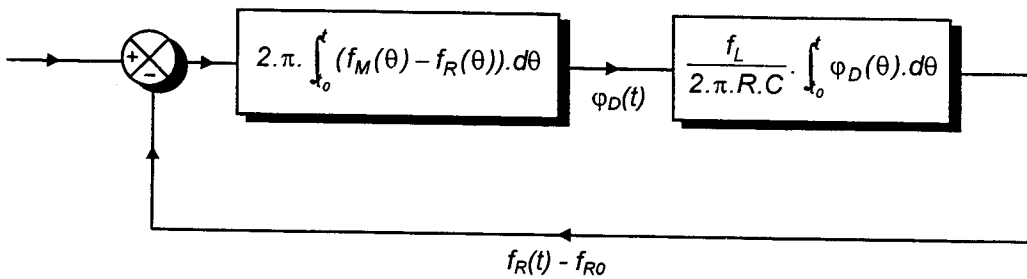


FIGURE 2-7 :

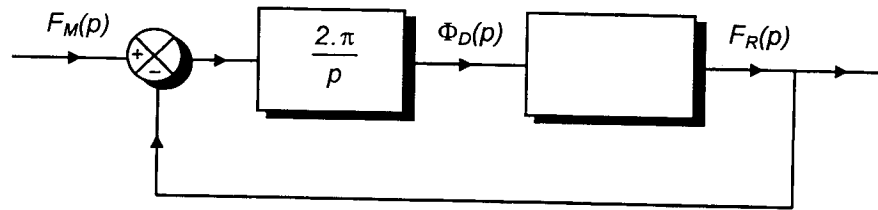


FIGURE 2-8 :

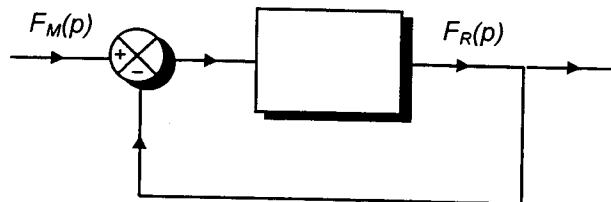


FIGURE 2-9 :

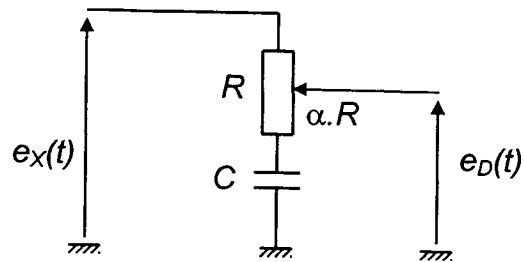


FIGURE 2-10 :

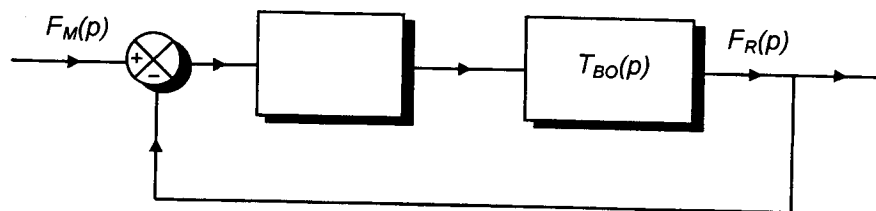




FIGURE 3-1 :

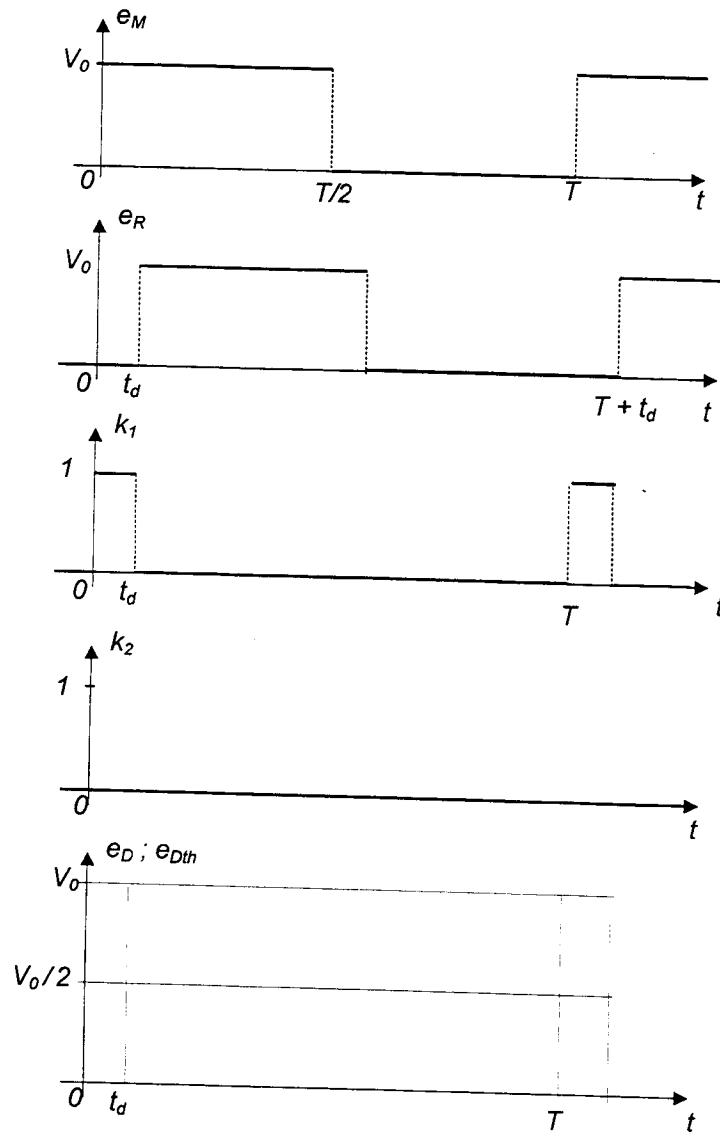
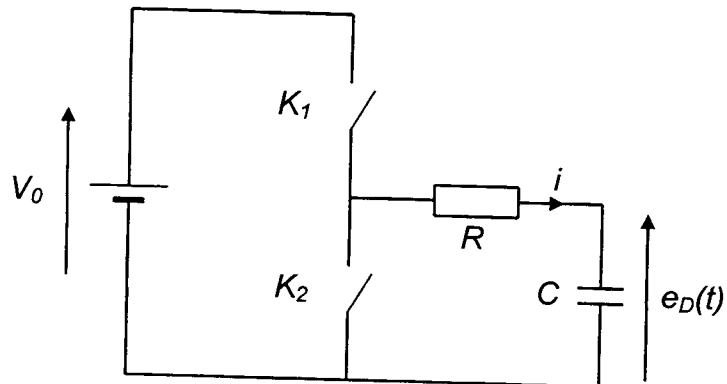


FIGURE 3-2 :



# SOLUTION

N° :

Prénom :

NOM :

## B.T.S. ÉLECTRONIQUE Session 1999

### ÉPREUVE DE PHYSIQUE APPLIQUÉE

(durée : 4 h ; coefficient : 5)

*Les candidats répondront aux questions posées sur le texte même de l'épreuve qu'ils remettront aux surveillants en quittant la salle d'examen.*

*La place réservée aux réponses dans le corps de l'épreuve conduit à un nombre important de pages, mais la longueur réelle de l'épreuve est sans commune mesure avec ce nombre de pages.*

\_\_\_\_\_

*L'épreuve comporte trois parties :*

- 1 - Étude d'un filtre ;*
- 2 - Étude générale d'une boucle à verrouillage de phase ;*
- 3 - Étude du comparateur de phase de la boucle.*

*Ces trois parties sont indépendantes même si on utilise, dans la troisième partie, des définitions ou des figures données dans la deuxième partie.*

\_\_\_\_\_

*Lors des applications numériques, les résultats seront donnés avec deux ou trois chiffres significatifs.*

1 - ÉTUDE D'UN FILTRE

PRÉSENTATION :

En sortie du synthétiseur de parole de la carte principale (Main Board) du dispositif étudié, se trouve un filtre dont le schéma structurel est donné à la figure 1-1, page 5. Ce filtre est construit autour de trois amplificateurs opérationnels (AO) supposés parfaits. La tension d'entrée du filtre est  $e(t)$  et celle de sortie est  $s(t)$ .

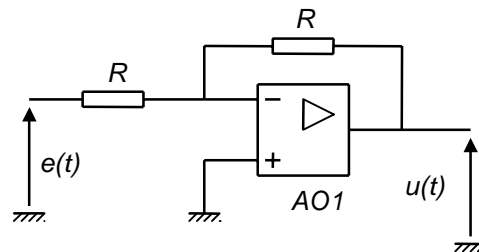
Le but de cette étude est de déterminer la transmittance, isomorphe ou isochrone, du filtre sans faire de calcul complet sur le schéma.

Un système automatique de mesures a permis de relever :

- la réponse indicielle (figure 1-2) du filtre quand la tension  $e(t)$  passe de 0,0 V à 1,0 V à l'instant origine ;
- la réponse fréquentielle du filtre dans la représentation de Bode avec la courbe de gain (figure 1-3, page 6) et la courbe de phase (figure 1-4).

STABILITÉ DU FONCTIONNEMENT LINÉAIRE DU FILTRE :

Q 1-1 : Pour le régime continu, dessiner le schéma simplifié du filtre autour de AO1 et montrer que cet amplificateur a bien une contre - réaction.



Nous retrouvons la structure classique d'un inverseur.

Q 1-2 : En déduire l'amplification du filtre en continu.

En continu, l'amplification du filtre est égale à 1 car  $s(t) = - u(t) = - (- e(t)) = e(t)$ .

.....  
 .....

Q 1-3 : À partir de la réponse indicielle, donner un élément graphique permettant de confirmer la stabilité du fonctionnement linéaire du filtre.

La limite finie de la réponse indicielle, quand  $t$  tend vers l'infini, permet de confirmer la stabilité du fonctionnement linéaire du filtre.

.....

UTILISATION DE LA RÉPONSE FRÉQUENTIELLE :

Q 1-4 : Avec la courbe de gain, donner la nature du filtre en justifiant la réponse.

Le filtre est globalement un filtre passe-bas car, à partir d'un gain fini en continu, nous avons un gain (en dB) qui tend vers « moins l'infini » en HF.

Q 1-5 : Avec les courbes de gain et de phase, donner la transmittance isochrone  $\underline{I}(j.\omega)$  pour la pulsation  $\omega$  nulle.

Pour  $\omega$  nulle, le module est égal à 1 et l'argument à 0. Donc  $\underline{I}(j.0) = 1$ .

.....

Q 1-6 : Tracer l'asymptote oblique à la courbe de gain. Déterminer sa pente et les coordonnées de son point d'intersection avec l'asymptote horizontale à la courbe de gain. Répondre sur la figure 1-3.

Q 1-7 : En déduire l'ordre minimal du filtre.

Comme la pente de l'asymptote est de - 40 dB/décade, l'ordre du filtre est au moins de 2.

Q 1-8 : Tracer le diagramme asymptotique de la courbe de phase. Répondre sur la figure 1-4.

Q 1-9 : Donner un élément graphique de la courbe de phase permettant de confirmer que l'ordre minimal trouvé précédemment est l'ordre du filtre.

La courbe de phase décroît régulièrement de 0 ° à - 180 ° ; ce qui correspond bien à un filtre du deuxième ordre.

.....

Q 1-10 : En utilisant les éléments de réponses précédentes, donner l'expression générale d'une transmittance isochrone  $\underline{I}(j.\omega)$  possible du filtre en ne faisant apparaître que deux paramètres dont il nous reste à déterminer les valeurs numériques.

$$\underline{I}(j.\omega) = \frac{1}{1 + 2.m.j \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}$$

Q 1-11 : Déterminer graphiquement la fréquence  $f_0$  permettant d'avoir  $\underline{I}(j.\omega)$  purement imaginaire. Calculer numériquement la pulsation  $\omega_0$  correspondante.

Graphiquement :  $f_0 = 3,4$  kHz

$$\omega_0 = 2.\pi.f_0 = 21.10^3 \text{ rad/s}$$

.....

Q 1-12 : Quelle est la valeur du gain pour cette pulsation  $\omega_0$  ?

À  $\omega_0$ , le gain est nul donc le module de  $\underline{I}(j.\omega_0)$  est égal à 1.

.....

# SOLUTION

Q 1-13 : En déduire la valeur numérique approchée du paramètre manquant de  $\underline{I}(j.\omega)$ .

À la pulsation  $\omega_0$ , le module est égal à 1 mais aussi à  $1/(2.m)$  ; donc  $m = 0,5$

.....  
.....

Q 1-14 : Montrer qu'il existe un phénomène de résonance qui sera clairement entouré sur la représentation de Bode.

### UTILISATION DE LA RÉPONSE INDICIELLE :

Q 1-15 : Donner des éléments de la courbe de réponse indicielle qui permettent de conforter la réponse donnée à la question Q 1-4 sur la nature du filtre.

Avec la courbe de réponse indicielle, la valeur initiale  $s(0^+)$  est nulle, le temps de montée n'est pas nul, et la valeur finale est finie non nulle ; ce qui correspond à un filtre passe-bas.

.....  
.....

Q 1-16 : Quel est l'élément de la courbe de réponse indicielle qui permet de conforter la réponse donnée à la question Q 1-5 sur la valeur de  $\underline{I}(j.\omega)$  pour  $\omega = 0$  ?

La valeur finale de la réponse indicielle  $s(t)$  est égale à la valeur finale (1 V) de l'échelon  $e(t)$ .

.....  
.....

Q 1-17 : Entourer, sur la figure 1-2, les éléments de la courbe de réponse indicielle qui permettent de dire que l'ordre du filtre est plus grand que 1.

Q 1-18 : Sur la courbe de réponse indicielle, définir graphiquement la pseudo-période ( $T_P$ ) et le premier dépassement relatif ( $d$  en %). Estimer l'ordre de grandeur de ces deux paramètres.

Graphiquement, nous trouvons  $T_P$  de l'ordre de 0,34 ms et  $d$  de l'ordre de 17 %.

.....  
.....

Q 1-19 : Donner des éléments de réponse permettant de conforter l'accord, s'il existe, entre l'ordre de grandeur de ces deux derniers paramètres et l'ordre de grandeur des paramètres de  $\underline{I}(j.\omega)$  de la question Q 1-13.

Le dépassement relatif  $d$ , de l'ordre de 17 %, indique déjà que  $m$  est inférieur à 1. Pour un dépassement de 20 %,  $m$  est de l'ordre de 0,45 ; donc l'ordre de grandeur est correct.

La pseudo-période est de 0,34 ms ce qui donne une pseudo-fréquence de l'ordre de 3 kHz qui est inférieure à la fréquence propre  $f_0$  de 3,4 kHz. L'ordre est respecté.

.....

# SOLUTION

FIGURE 1-1 : SCHÉMA STRUCTUREL DU FILTRE

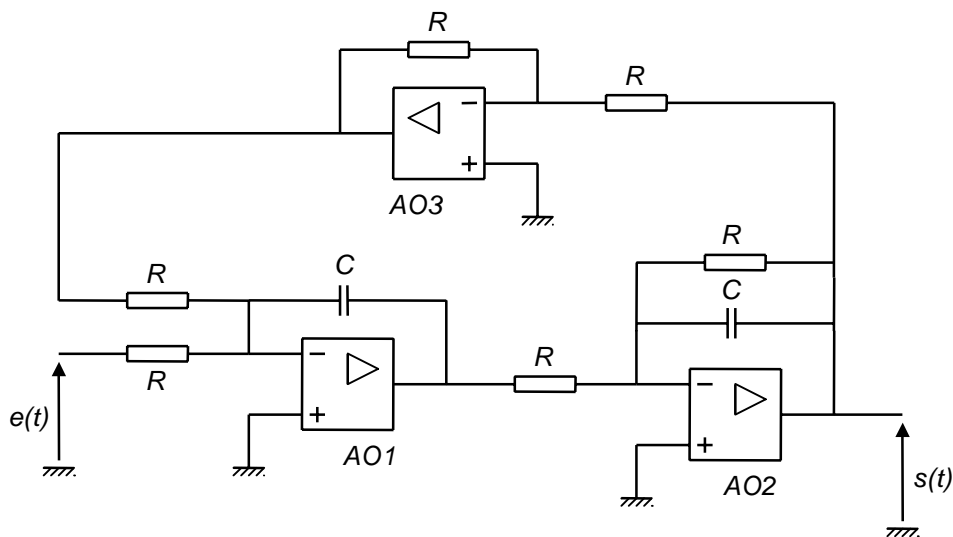
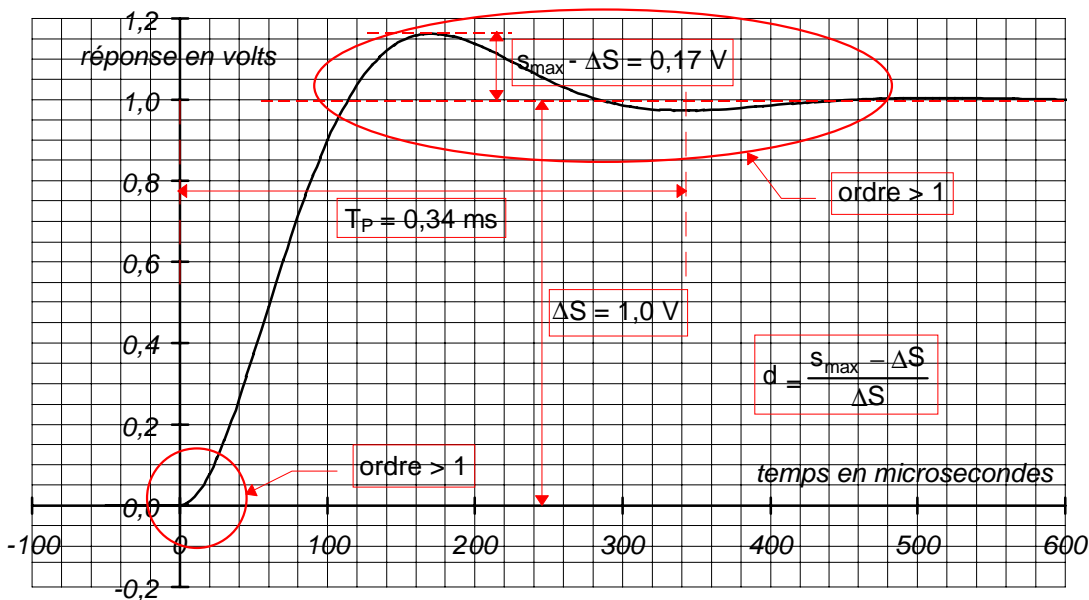


FIGURE 1-2 : RÉPONSE INDICIELLE DU FILTRE



# SOLUTION

FIGURE 1-3 : COURBE DE GAIN

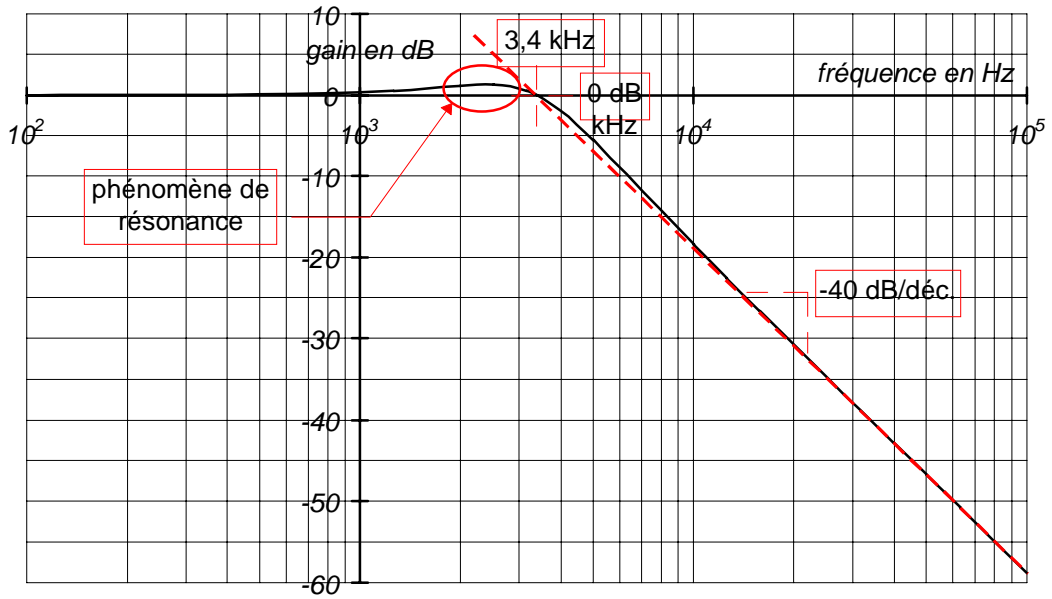
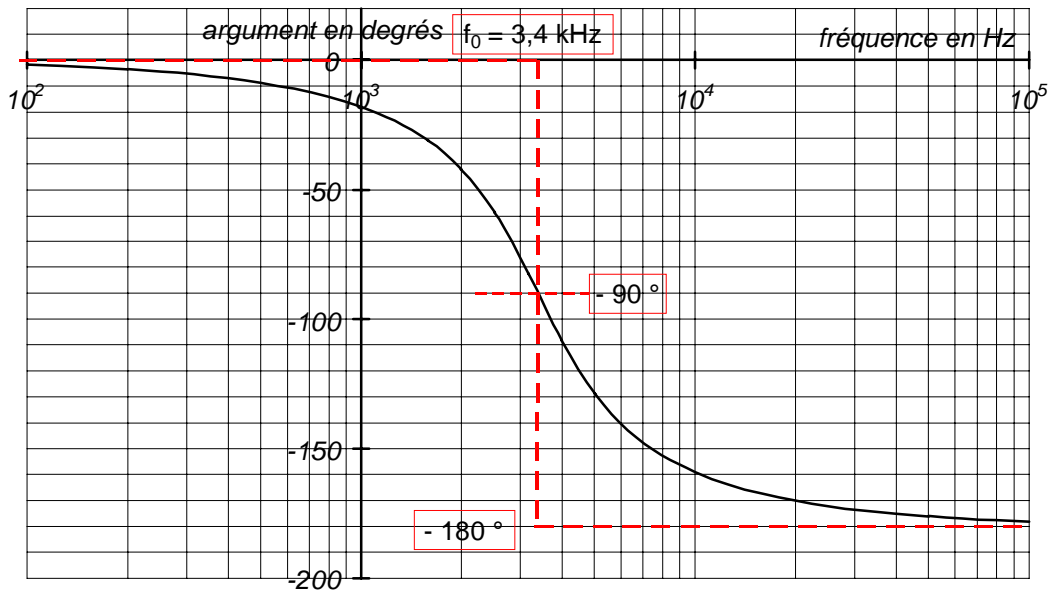


FIGURE 1-4 : COURBE DE PHASE



## 2 - ÉTUDE D'UNE BOUCLE À VERROUILLAGE DE PHASE

### PRÉSENTATION :

Une boucle à verrouillage de phase est insérée dans la partie "interface ligne téléphonique" du système étudié. Elle permet de savoir s'il y a appel téléphonique par détection d'une fréquence "musicale" de 330 Hz ou de 440 Hz (tonalité). Cette boucle est organisée autour du circuit intégré CMOS 4046 associé à un filtre passe-bas. Le circuit 4046 comporte deux éléments essentiels pour la boucle :

- un comparateur de phase ;
- un oscillateur commandé par une tension (V.C.O.).

Le schéma de la boucle complète est donné à la figure 2-1, page 14. Le circuit intégré 4046 est alimenté sous la tension  $V_0$  égale à 5,0 V.

Dans cette partie, on n'envisage pas le cas correspondant à une absence de tonalité ( $e_M(t) = C^{ste}$ ) ; on suppose que le signal  $e_M(t)$  devient porteur de l'une ou l'autre des deux tonalités : par modulation "FSK", la fréquence de  $e_M(t)$  prend brusquement soit la valeur 330 Hz, soit la valeur 440 Hz. La tension  $e_M(t)$  est donc le signal d'entrée de la boucle et porte l'information par sa fréquence  $f_M(t)$ .

Les tensions  $e_M(t)$  et  $e_R(t)$  sont deux tensions rectangulaires dont on suppose le rapport cyclique égal à  $\frac{1}{2}$  ; leur valeur est égale à  $V_0$  ou bien elle est nulle. Lorsque la boucle est verrouillée, en régime permanent, la tension  $e_R(t)$  est égale à  $e_M(t)$  :

- elle a même forme (rectangulaire de rapport cyclique  $\frac{1}{2}$ ) ;
- son amplitude est la même (sa valeur est soit 0 V, soit  $V_0$ ) ;
- sa fréquence instantanée  $f_R(t)$  est égale à  $f_M(t)$  ;
- sa phase instantanée  $\varphi_R(t)$  est égale à celle de  $e_M(t)$ , notée  $\varphi_M(t)$ .

On rappelle que la phase instantanée d'un signal périodique rectangulaire est la phase de son fondamental à l'instant  $t$ , donc, en choisissant  $t_0$  comme instant de référence :

$$\varphi_M(t) = \varphi_M(t_0) + 2 \cdot \pi \cdot \int_{t_0}^t f_M(\theta) \cdot d\theta \quad \text{et} \quad \varphi_R(t) = \varphi_R(t_0) + 2 \cdot \pi \cdot \int_{t_0}^t f_R(\theta) \cdot d\theta$$

De plus, prenant la référence des phases sur  $\varphi_M(t)$ , on pose :  $\varphi_M(t_0) = 0$ .

Nous admettons, dans cette partie, que la logique interne au 4046 et le filtre associé R-C, dont le schéma est donné à la figure 2-2, page 14, élaborent tout d'abord la différence des phases  $\varphi_D(t) = \varphi_M(t) - \varphi_R(t)$  puis permettent d'obtenir, à partir de  $\varphi_D(t)$ , la tension  $e_D(t)$  suivante :



## SOLUTION

$$e_D(t) = e_D(t_0) + \frac{V_0}{4 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \cdot \int_{t_0}^t \varphi_D(\theta) \cdot d\theta \quad (\text{Cette relation sera notée } R).$$

Enfin la fréquence  $f_R(t)$  de la tension  $e_R(t)$ , fournie par l'oscillateur "V.C.O.", est réglée  $e_D(t)$  : quand  $e_D$  varie de 0 V à  $V_0$ ,  $f_R$  varie de  $f_{min}$  à  $f_{max}$  comme l'indique la figure 2-3.

La fréquence centrale de l'oscillateur "V.C.O." est notée  $f_{R0}$  :  $f_{R0} = f_{min} + f_L$

### RÉDUCTION DE SCHÉMA :

Q 2-1 : À partir de la courbe donnant le fonctionnement de l'oscillateur "V.C.O.", exprimer la fréquence  $f_R$  en fonction de  $e_D$  et des paramètres  $f_{min}$ ,  $f_L$  et  $V_0$  lorsque, comme sur la figure 2-3, la tension  $e_D$  varie entre 0 et  $V_0$ .

$$f_R = f_{min} + \frac{2 \cdot f_L}{V_0} \cdot e_D$$

Q 2-2 : Sur la figure 2-4, page 15, compléter les parties aboutissant au sommateur élaborant la fréquence  $f_R(t)$ .

Q 2-3 : La fréquence  $f_M(t)$ , grandeur à détecter, est placée en entrée de la boucle de la figure 2-4. Que faut-il placer dans le bloc élaborant  $\varphi_M(t)$  à partir de  $f_M(t)$  ? Répondre sur la figure 2-4.

Q 2-4 : On suppose qu'à l'instant  $t_0$ , choisi comme origine des temps, la boucle verrouillée fonctionne en régime permanent avec une fréquence  $f_M$  égale à  $f_{R0}$ , fréquence centrale de l'oscillateur "V.C.O."

Que valent  $\varphi_R(t_0)$ ,  $\varphi_D(t_0)$  et  $e_D(t_0)$  ?

À  $t_0$ ,  $\varphi_R(t_0) = \varphi_M(t_0) = 0$ , donc  $\varphi_D(t_0) = 0$  et pour avoir  $f_R = f_{R0}$  il faut  $e_D(t_0) = V_0/2$ .

Remarque : ces conditions initiales seront maintenues jusqu'à la fin du problème.

Q 2-5 : Avec les conditions précédentes, la figure 2-4 peut être simplifiée en la figure 2-5. Que faut-il mettre dans le bloc situé juste après le comparateur d'entrée ? Répondre sur la figure 2-5.

Q 2-6 : On peut encore simplifier la boucle précédente et la rendre conforme à celle de la figure 2-6. Préciser sur la figure 2-6 ce que doit être la grandeur d'entrée de cette dernière boucle.

### ÉTUDE DE LA STABILITÉ DU FONCTIONNEMENT DE LA BOUCLE :

À la variation  $(f_M(t) - f_{R0})$  de la grandeur d'entrée, nous faisons correspondre sa transformée de Laplace  $F_M(p)$ .

# SOLUTION

De même, à la variation  $(f_R(t) - f_{R0})$ , nous faisons correspondre la transformée de Laplace  $F_R(p)$ , et à  $\varphi_D(t)$ , sa transformée  $\Phi_D(p)$ .

Q 2-7 : Que faut-il alors placer dans le bloc fonctionnel liant  $F_R(p)$  à  $\Phi_D(p)$  de la figure 2-7, page 16 ? Répondre sur la figure 2-7.

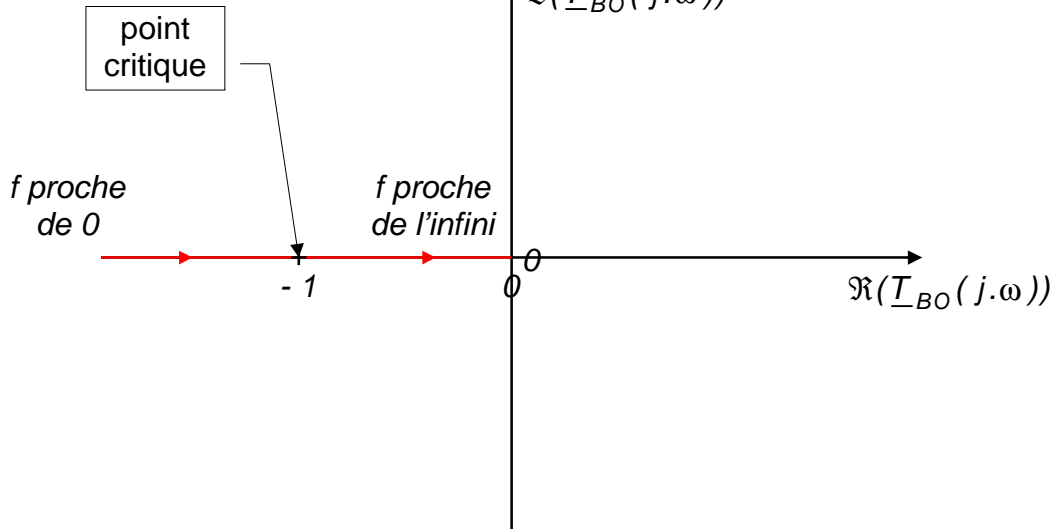
Q 2-8 : La figure 2-8 présente le schéma de boucle le plus réduit possible. Que faut-il placer dans le bloc fonctionnel ? Répondre sur la figure 2-8.

Q 2-9 : Donner l'expression de la transmittance isomorphe  $T_{BO}(p)$  de la boucle ouverte de la figure 2-8 et celle de sa transmittance isochrone  $\underline{T}_{BO}(j.\omega)$ .

$$T_{BO}(p) = \frac{f_L}{R.C.p^2}$$

$$\underline{T}_{BO}(j.\omega) = \frac{-f_L}{R.C.\omega^2}$$

Q 2-10 : Tracer le diagramme de Nyquist  $\mathcal{N}(\underline{T}_{BO}(j.\omega))$ .



Q 2-11 : Rappeler l'énoncé du critère du revers de Nyquist.

Lorsque le diagramme de Nyquist, relatif à la transmittance en boucle ouverte et parcouru dans le sens des fréquences croissantes, laisse le point critique  $(0 ; -1)$  sur sa gauche, le système a un fonctionnement stable en boucle fermée.

Q 2-12 : Déterminer alors si le modèle de la boucle ouverte offre un fonctionnement stable en boucle fermée.

Pour notre boucle, le diagramme de Nyquist passe par le point critique : le système est instable en boucle fermée ; il doit même osciller.

Q 2-13 : À partir de la figure 2-8, calculer la transmittance isomorphe  $T_{BF}(p)$  en boucle fermée.

$$T_{BF}(p) = \frac{1}{1 + \frac{R.C.p^2}{f_L}}$$

Q 2-14 : Montrer que le résultat de la question Q 2-12 est cohérent avec celui de la question précédente Q 2-13.

$T_{BF}(p)$  est l'expression d'une transmittance isomorphe d'un système du deuxième ordre sans amortissement : il y a obligatoirement instabilité en boucle fermée.

.....

.....

AMÉLIORATION DE LA STABILITÉ DE LA BOUCLE :

Le fonctionnement réel de la boucle à verrouillage de phase, avec le filtre R-C de la figure 2-2, n'est pas instable. Ceci est dû au fait que la relation R donnée dans la présentation de la boucle (bas de la page 7) n'est qu'une relation approchée qui en simplifie l'analyse. Ce fonctionnement est toutefois très fortement oscillatoire.

Nous continuons à utiliser le modèle simplifié de la boucle à verrouillage de phase pour expliquer l'amélioration de la stabilité avec le remplacement du filtre passe-bas de la figure 2-2, page 14, par celui de la figure 2-9, page 16.

Avec le nouveau filtre, la tension  $e_D(t)$  appliquée à l'oscillateur "V.C.O." est prise aux bornes d'un dipôle constitué par la mise en série de C et de la portion  $\alpha.R$  de la résistance R (R et C ont les mêmes valeurs pour les deux filtres). De ce fait, on admet que la transmittance isochrone de la boucle ouverte qui était égale à  $\underline{T}_{BO}(j.\omega)$  avec le filtre R-C initial devient égale à  $\underline{T}_{BOC}(j.\omega)$  avec le filtre corrigé :

$$\underline{T}_{BOC}(j.\omega) = -f_L \cdot \frac{1 + j.\alpha.R.C.\omega}{R.C.\omega^2}$$

Q 2-15 : Donner la transmittance isochrone  $\underline{T}(j.\omega)$  du filtre R-C de la figure 2-2 et la transmittance isochrone  $\underline{T}_C(j.\omega)$  du filtre corrigé. Calculer le rapport  $\underline{T}_C(j.\omega)/\underline{T}(j.\omega)$  et expliquer pourquoi le changement de filtre transforme la transmittance  $\underline{T}_{BO}$  de la question 2-9 en  $\underline{T}_{BOC}$  donnée ci-dessus.

$$\underline{T}(j.\omega) = \frac{1}{1 + j.R.C.\omega} \quad \underline{T}_C(j.\omega) = \frac{1 + \alpha.j.R.C.\omega}{1 + j.R.C.\omega} \quad \frac{\underline{T}_C(j.\omega)}{\underline{T}(j.\omega)} = 1 + \alpha.j.R.C.\omega$$

qui est dans le même rapport que  $\underline{T}_{BOC}/\underline{T}_{BO}$ .

Q 2-16 : À partir de l'expression de  $T_{BOC}(p)$ , faire apparaître la transmittance isomorphe  $C(p)$  d'un correcteur dans le bloc vide de la figure 2-10 ; celle-ci représentant le schéma de la nouvelle boucle dans lequel  $T_{BO}(p)$  est toujours l'expression établie à la question Q 2-8.

Q 2-17 : Donner le type du correcteur de transmittance  $C(p)$  équivalent au changement de filtre ; par exemple : à action proportionnelle ; à actions proportionnelle et intégrale ; à actions proportionnelle, intégrale et dérivée ; etc.  
Le correcteur est à action proportionnelle et dérivée.

.....

Q 2-18 : Calculer la transmittance isomorphe  $T_{BFC}(p)$  de la boucle fermée corrigée. Quel est l'intérêt de la correction effectuée ?

$$T_{BFC}(p) = \frac{1 + \alpha \cdot R \cdot C \cdot p}{1 + \alpha \cdot R \cdot C \cdot p + \frac{R \cdot C \cdot p^2}{f_L}}$$

Cette transmittance est celle d'un système du deuxième ordre avec un amortissement positif non nul : nous retrouvons l'effet de la stabilisation par le correcteur P.D.

.....

### 3 - ÉTUDE DU COMPAREUR DE PHASE

Lorsque le circuit intégré 4046 fonctionne avec le filtre R-C de la figure 2-2, nous avons admis dans la partie précédente que la relation R du bas de la page 7 établissait la relation entre  $\varphi_D(t)$  et  $e_D(t)$ . Dans cette troisième partie, nous nous proposons de montrer que R n'est qu'une relation approchée. Ceci explique les différences entre le fonctionnement de la boucle réelle et celui qu'implique le modèle simplifié précédent.

La figure 3-1, page 17, donne un exemple de signaux  $e_M(t)$  et  $e_R(t)$  dans lequel  $e_M(t)$  est en avance d'une durée  $t_d$  sur  $e_R(t)$  ; c'est le seul cas qui sera étudié car l'autre, où  $e_M(t)$  serait en retard sur  $e_R(t)$ , donnerait des résultats en tous points analogues.

À partir des signaux  $e_M(t)$  et  $e_R(t)$ , on peut considérer que le circuit 4046 élabore les signaux logiques  $k_1(t)$  et  $k_2(t)$  qui sont représentés sur la figure 3-1.

La tension  $e_D(t)$ , appliquée à l'entrée de l'oscillateur "V.C.O.", est alors celle que l'on trouve aux bornes du condensateur de capacité C de la figure 3-2 :

- lorsque  $k_1 = 1$  et  $k_2 = 0$  : l'interrupteur  $K_1$  est fermé,  $K_2$  est ouvert et la tension  $V_0$  est appliquée au dipôle R-C ;
- lorsque  $k_1 = 0$  et  $k_2 = 1$  :  $K_1$  est ouvert,  $K_2$  est fermé, le dipôle R-C est en court-circuit ;
- lorsque  $k_1 = k_2 = 0$  :  $K_1$  et  $K_2$  sont ouverts (état de haute impédance).

## SOLUTION

On prendra :  $R = 47 \text{ k}\Omega$  ;  $C = 0,22 \text{ }\mu\text{F}$  ;  $V_0 = 5,00 \text{ V}$  ;  $f_{\min} = 280 \text{ Hz}$  ;  $f_{\max} = 480 \text{ Hz}$  ; voir la figure 2-3.

On suppose, dans un premier temps, que la fréquence  $f_M$  de  $e_M(t)$  est égale à la fréquence centrale  $f_{R0} = 380 \text{ Hz}$  de l'oscillateur "V.C.O."

À l'instant  $t = 0$ , la tension  $e_D(0)$  aux bornes de  $C$  est égale à  $\frac{V_0}{2} = 2,50 \text{ V}$ , ce qui entraîne, pour la tension  $e_R(t)$ , la fréquence  $f_R = f_M = f_{R0} = 380 \text{ Hz}$ .

L'avance initiale de  $e_M(t)$  par rapport à  $e_R(t)$  est égale à  $t_d = 0,26 \text{ ms}$ .

Q 3-1 : On admet que de  $t = 0$  à  $t = T$ , intervalle de temps étudié, les variations de la tension  $e_D(t)$  sont faibles devant  $V_0$  : le courant  $i(t)$  qui parcourt la résistance  $R$  de la figure 3-1, lorsqu'il existe, peut donc être considéré comme constant et égal à sa valeur initiale  $i(0)$  ; la période  $T_R$  de  $e_R(t)$  peut également être considérée comme constante et égale à la période  $T_M = T$  de  $e_M(t)$ .

Exprimer  $i(0)$  en fonction de  $V_0$  et de  $R$ . Quelle est la charge  $\delta q$  stockée par le condensateur pendant une période  $T$ . En déduire l'expression de la variation  $\delta e_D$  de la tension  $e_D$  sur la période  $T$ , en fonction de  $R$ ,  $C$ ,  $V_0$  et  $t_d$ . Application numérique : calculer  $\delta e_D$ .

$$i(0^+) = \frac{V_0 - e_D(0^+)}{R} = \frac{V_0}{2.R} \quad \text{et} \quad \delta q = i(0^+) \cdot t_d = \frac{V_0 \cdot t_d}{2.R}$$

$$\delta e_D = \frac{\delta q}{C} = \frac{V_0 \cdot t_d}{2.R.C} = 63 \text{ mV}$$

Q 3-2 : Dessiner l'allure de  $e_D(t)$  au bas de la figure 3-1 (pour plus de clarté, on pourra exagérer la variation  $\delta e_D$  par rapport à  $V_0/2$ ).

Q 3-3 : Exprimer la différence de phase  $\varphi_D = \omega \cdot t_d$ , en radians, en fonction de  $T$  et de  $t_d$ .

$$\varphi_D = \frac{2 \cdot \pi \cdot t_d}{T}$$

Q 3-4 : En utilisant les approximations de la question 3-1 ( $\varphi_D = C^{ste}$  de 0 à  $T$ ), donner, sur cet intervalle de temps, l'expression littérale de  $e_{Dth}(t)$  fournie par la relation R de la page 7. Exprimer la variation  $\delta e_{Dth}$  de  $e_{Dth}$  sur une période  $T$  en fonction de  $R$ ,  $C$ ,  $V_0$  et  $t_d$ .

$$e_{Dth}(t) = e_{Dth}(0^+) + \frac{V_0}{4 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \cdot \int_0^t \frac{2 \cdot \pi \cdot t_d}{T} \cdot d\theta = \frac{V_0}{2} + \frac{V_0 \cdot t_d}{2 \cdot R \cdot C} \cdot \frac{t}{T}$$

$$\delta e_{Dth} = e_{Dth}(T) - e_{Dth}(0^+) = \frac{V_0 \cdot t_d}{2 \cdot R \cdot C}$$

Q 3-5 : Comparer  $\delta e_{Dth}$  et  $\delta e_D$ .

Nous obtenons deux valeurs égales.

.....  
 Q 3-6 : Représenter graphiquement  $e_{Dth}(t)$  sur la figure 3-1.

Q 3-7 : **Conclusion sur le cas où  $e_D$  est proche de  $\frac{V_0}{2}$ .**

Qualifier l'approximation qui consiste à remplacer la fonction  $e_D(t)$  par la fonction  $e_{Dth}(t)$  ~~tirée de R en choisissant l'une des phrases suivantes (rayer alors les deux autres), ou en donnant une réponse différente (rayer alors les phrases a, b et c).~~

~~a) elle consiste à remplacer  $e_D(t)$  par son premier harmonique~~

~~b) c'est une simple linéarisation sur une période~~

c) elle est mauvaise car, après une période de  $e_M(t)$ , les variations de  $e_{Dth}(t)$  et de  $e_D(t)$  sont différentes.

.....  
 On suppose maintenant que la tension  $e_M(t)$  a pour fréquence  $f_M = 330$  Hz et que la boucle est verrouillée :  $e_D(0) = \frac{V_0}{4} = 1,25V$ .

À partir de cet état, une perturbation entraîne une différence de phase  $\varphi_D > 0$  entre  $e_M(t)$  et  $e_R(t)$  :  $e_M(t)$  est en avance sur  $e_R(t)$  d'une durée  $t_d$ .

Q 3-8 : Calculer le courant  $i$  (supposé constant) qui parcourt la résistance  $R$  de la figure 3-2 lorsque l'interrupteur  $K_1$  est fermé pour  $t > 0$ .

$$i = \frac{V_0 - e_D(0^+)}{R} = \frac{3 \cdot V_0}{4 \cdot R}$$

Q 3-9 : En déduire la variation  $\delta e_D$  de  $e_D$  sur la période  $T$ . Application numérique avec  $t_d = 0,26$  ms.

$$\delta e_D = \frac{\delta q}{C} = \frac{i(0^+) \cdot t_d}{C} = \frac{3 \cdot V_0 \cdot t_d}{4 \cdot R \cdot C} = 94 \text{ mV}$$

.....  
 Q 3-10 : Montrer que pour  $t_d = 0,26$  ms, la variation  $\delta e_{Dth}$  de  $e_{Dth}$  sur une période  $T$ , calculée à partir de  $R$ , à la même valeur qu'à la question 3-4.

$$e_{Dth}(t) = e_{Dth}(0^+) + \frac{V_0}{4 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \int_0^t \frac{2 \cdot \pi \cdot t_d}{T} \cdot d\theta = \frac{V_0}{4} + \frac{V_0 \cdot t_d}{2 \cdot R \cdot C} \cdot \frac{t}{T}$$

$$\delta e_{Dth} = e_{Dth}(T) - e_{Dth}(0^+) = \frac{V_0 \cdot t_d}{2 \cdot R \cdot C} = 63 \text{ mV}$$

Q 3-11 : **Conclusion sur le cas où  $e_D$  est éloignée de  $\frac{V_0}{2}$ .**

Qualifier l'approximation qui consiste à remplacer la fonction  $e_D(t)$  par la fonction  $e_{Dth}(t)$  ~~tirée de R en choisissant l'une des phrases suivantes (rayer les deux autres), ou en donnant une réponse différente (rayer alors les phrases a, b et c).~~

a) elle consiste à remplacer  $e_D(t)$  par son premier harmonique

b) c'est une simple linéarisation sur une période

# SOLUTION

c) elle est mauvaise car, après une période de  $e_M(t)$ , les variations de  $e_{Dth}(t)$  et de  $e_D(t)$  sont différentes.

---

FIGURE 2-1 : BOUCLE COMPLÈTE

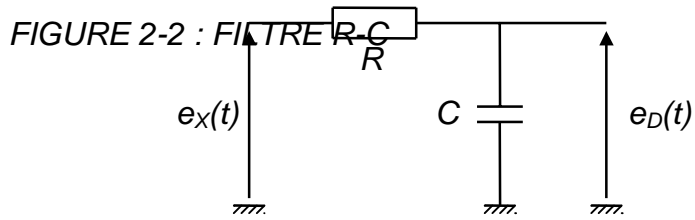
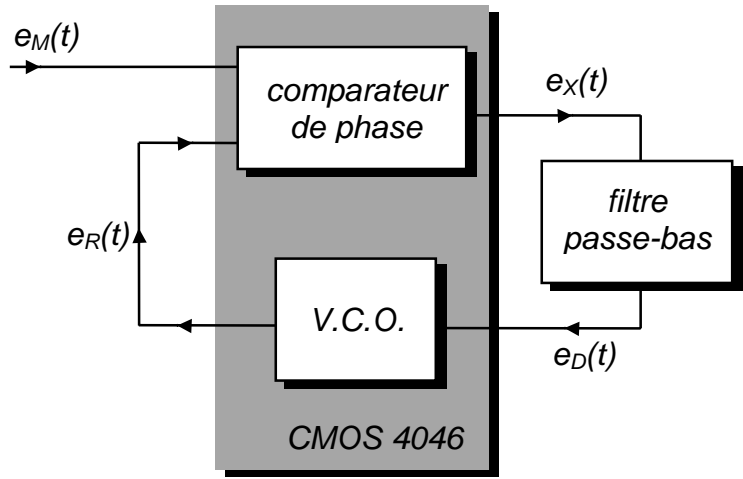
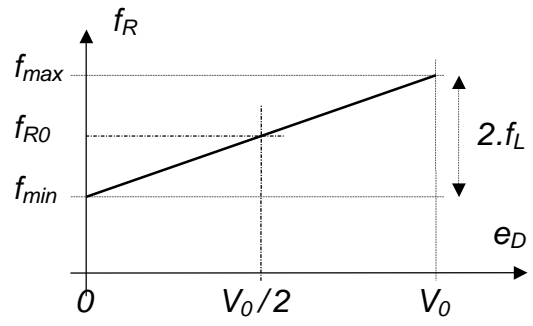


FIGURE 2-3 : CARACTÉRISTIQUE DE L'OSCILLATEUR "V.C.O."



# SOLUTION

FIGURE 2-4 :

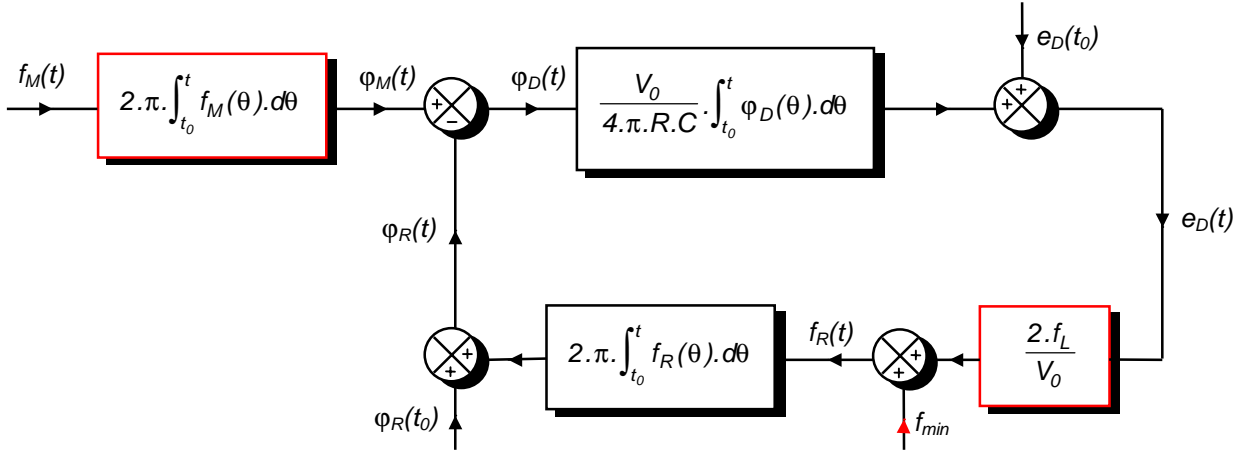


FIGURE 2-5 :

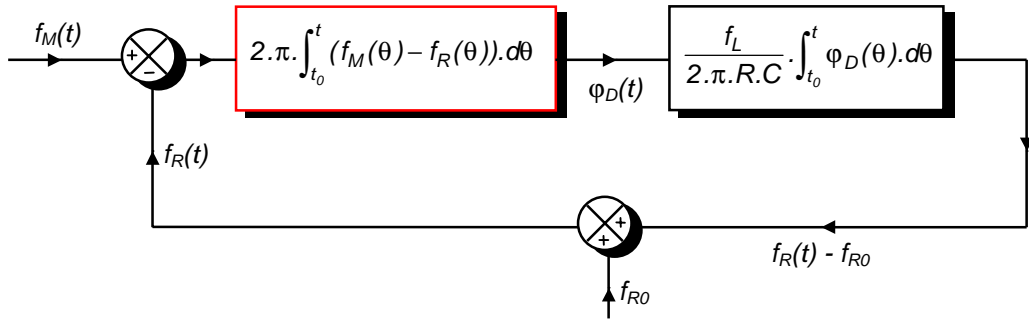
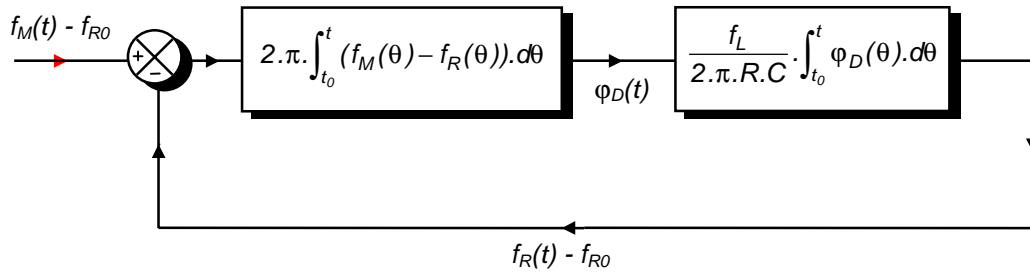


FIGURE 2-6 :





**SOLUTION**

FIGURE 2-7 :

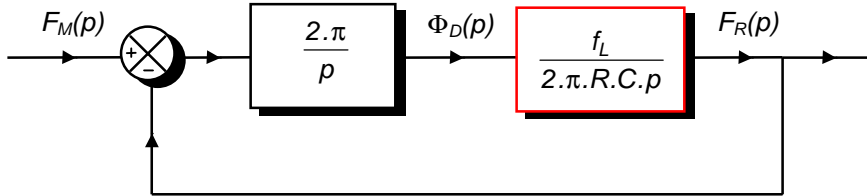


FIGURE 2-8 :

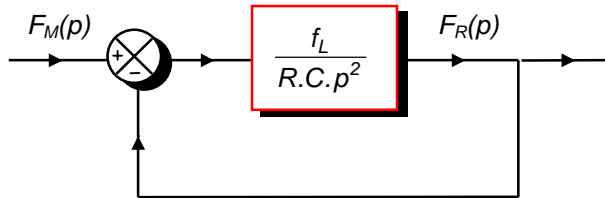


FIGURE 2-9 :

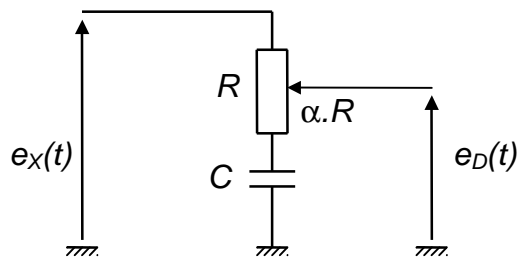
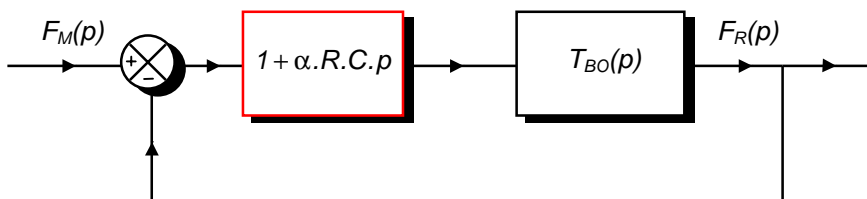


FIGURE 2-10 :



# SOLUTION

