**ETUDE DE LA REPONSE AUX BASSES FREQUENCES D'UN ETAGE AMPLIFICATEUR : INFLUENCE ET CALCUL DES CAPACITES DE LIAISONS [1]**

Nous avons recherché les performances d'un étage amplificateur en nous plaçant aux fréquences moyennes où les capacités de liaisons étaient considérées comme des impédances très faibles. Dans ces conditions, le gain en tension du montage est indépendant de la fréquence et la courbe de réponse en fréquences présente un « plateau ». Si on se place maintenant aux basses fréquences, l'impédance des condensateurs de liaisons doit être prise en compte et le gain du montage est dépendant de la fréquence.

La figure 1 représente le schéma permettant de faire cette étude. On notera que l'étage amplificateur est représenté sous sa forme simplifiée ou de synthèse avec : $R_e$, $A_{v0}$, $R_s$ (si les résistances d'entrée $R_e$ et de sortie $R_s$ sont respectivement indépendantes de $R_u$ et $R_g$).

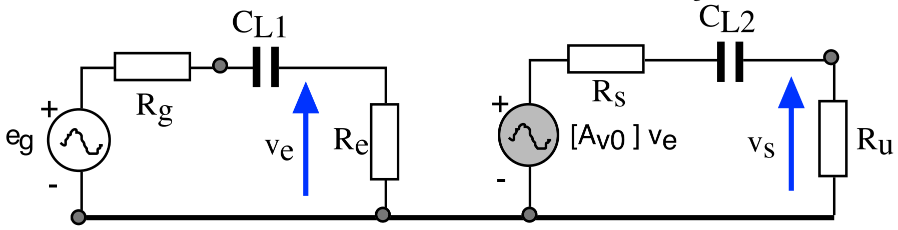



Figure 1

## 1° PARTIE : ANALYSE ET GRAPHE ASYMPTOTIQUE DE BODE

1) Montrer que l'expression du gain du montage complet, aux basses fréquences, se met sous la forme :

$$\frac{v_s}{e_g} = [\frac{v_s}{e_g}]_{fréqmoy}[\frac{1}{(1-j\frac{f_{ce}}{f})}]\ [\frac{1}{(1-j\frac{f_{cs}}{f})}]$$

$$[\frac{v_s}{e_g}]_{fréqmoy} = A_{v0}\frac{R_e R_u}{(R_g+R_e)(R_s+R_u)} \quad f_{ce} = \frac{1}{2\pi(R_g+R_e)C_{L1}} \quad f_{cs} = \frac{1}{2\pi(R_s+R_u)C_{L2}}$$

$f_{ce}$ et $f_{cs}$ sont les fréquences de coupure à - 3dB de l'entrée et de la sortie du montage.
Cette expression permet l'étude de la réponse en fréquence de l'étage amplificateur par l'intermédiaire du graphe asymptotique de Bode qui représente l'évolution en fonction de la fréquence :

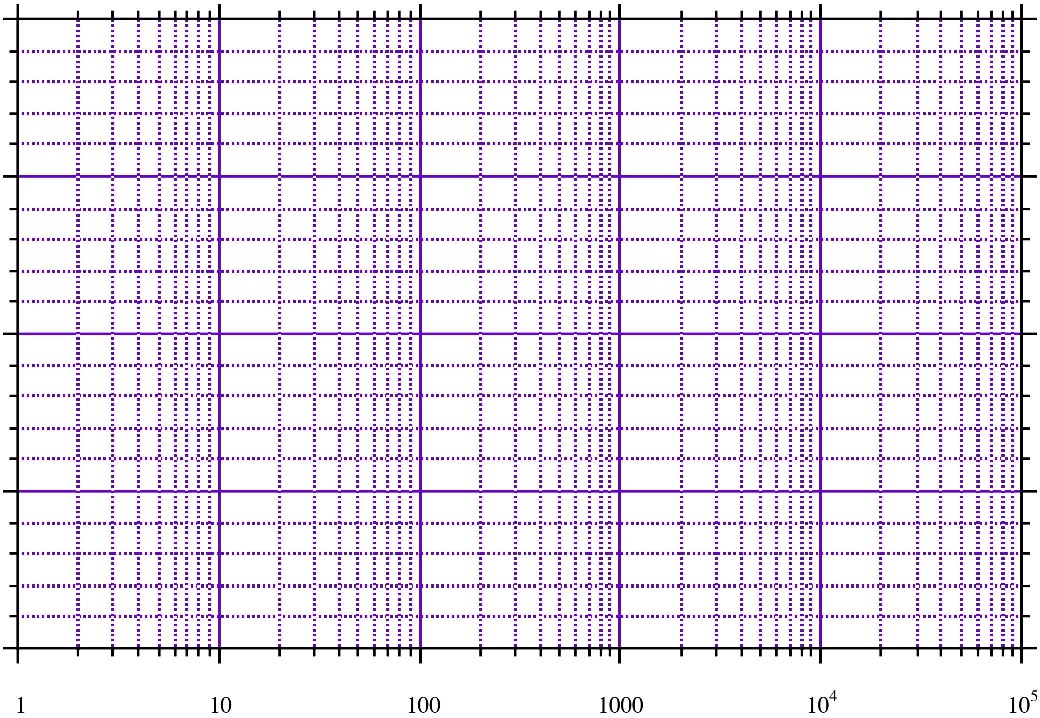
- Du module du gain du montage complet : $v_s$ / $e_g$ exprimé en déciBels
- Du déphasage $\Phi$ de $v_s$ par rapport à $e_g$.

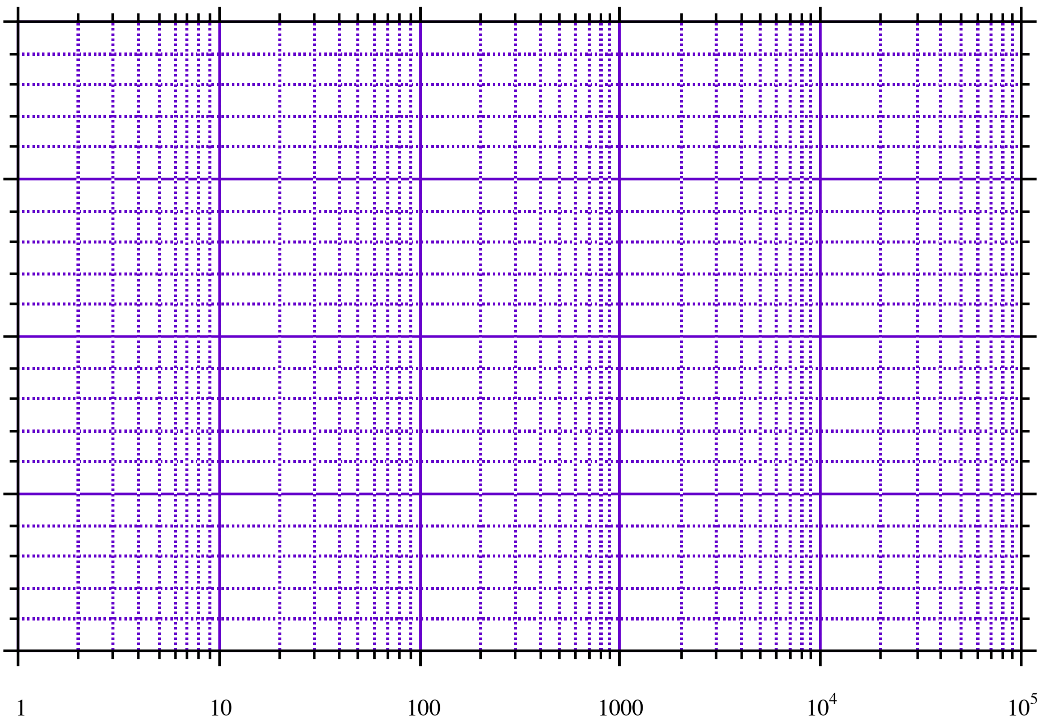
2) On donne : $R_g$ = 1kΩ, $R_e$ = 600Ω, $A_{V0}$ = -160, $R_s$ = 1kΩ et $R_u$ = 1kΩ.
A titre d'exemple, sachant que l'on a choisi :

[1] Ph.ROUX © 2009 rouxphi3.perso.cegetel.net

- $C_{L1}$ = 1 µF donnant : $f_{ce}$ = 100 Hz
- $C_{L2}$ = 27 nF conduisant à : $f_{cs}$ = 3 K Hz

Tracer sur du papier semi-logarithmique 5 modules,. En déduire la fréquence de coupure à - 3 dB du montage ?



## 2° PARTIE : SYNTHESE ET CALCUL DES CAPACITES DE LIAISONS

Pour calculer la valeur des condensateurs de liaisons, il faut se fixer, aux très basses fréquences, une valeur de l'atténuation $A_t$ en dB du gain $|v_s / e_g|$ par rapport aux fréquences moyennes où la courbe de réponse présente une zone de plateau (figure 2).

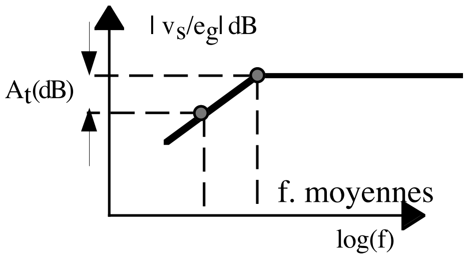



Figure 2

1) Quelle est l'expression de l'atténuation $A_t$ (dB) ?

2) En déduire la valeur à donner aux condensateurs de liaisons $C_{L1}$ et $C_{L2}$ pour que cette atténuation à la fréquence de 500 Hz soit globalement égale à -3 dB. A cet effet, on supposera par exemple que les circuits RC d'entrée et de sortie apportent chacun une atténuation de - 1,5 dB.

# CALCUL D'UN CONDENSATEUR DE DECOUPLAGE

## Méthode générale de calcul d'une capacité de découplage.

La présence d'une capacité de découplage $C_D$ placée entre un nœud N d'un étage amplificateur et la masse a pour fonction :

- En régime continu, de maintenir le nœud à un potentiel fixe par rapport à la masse.
- En régime variable, de réunir ce nœud à la masse.

En régime des petites variations sinusoïdales, il est toujours possible de représenter l'ensemble de l'étage amplificateur vu par la capacité de découplage $C_d$ par le générateur de Thévenin ($e_{th}$, $R_{th}$) équivalent. On obtient alors le schéma donné en figure1 qui correspond à un circuit RC passe-bas.

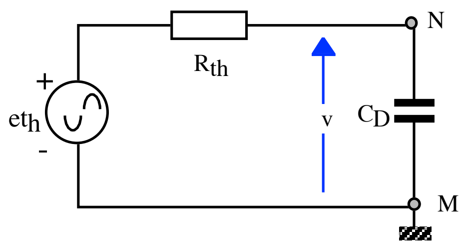



Figure 1

Pour mettre en évidence l'efficacité de la capacité $C_D$, on définit la fonction découplage associée à la capacité $C_D$ : $F_{déc.} = \left| \frac{e_{th} - v}{e_{th}} \right|_{dB}$ (1).

Ainsi, lorsque le découplage réalisé par la capacité $C_D$ à une fréquence donnée est parfait, la tension v est nulle et la fonction découplage a pour valeur 0 dB.

Rechercher, à partir de la relation (1), l'expression de $F_{déc}$ en fonction de la fréquence, $C_D$ et $R_{th}$.

**Exemple de calcul d'une capacité de découplage.**

Nous avons choisi pour exemple le nœud d'émetteur du montage amplificateur en Emetteur Commun étudié en cours. Le schéma du montage est donné en figure 2. L'émetteur du transistor est découplé par l'intermédiaire d'une capacité $C_d$ que nous allons calculer à l'aide de la fonction découplage $F_{déc}$.
On donne le gain en courant du transistor : $\beta = 94$ et son courant : $I_{Crepos} = 6.5$ mA.

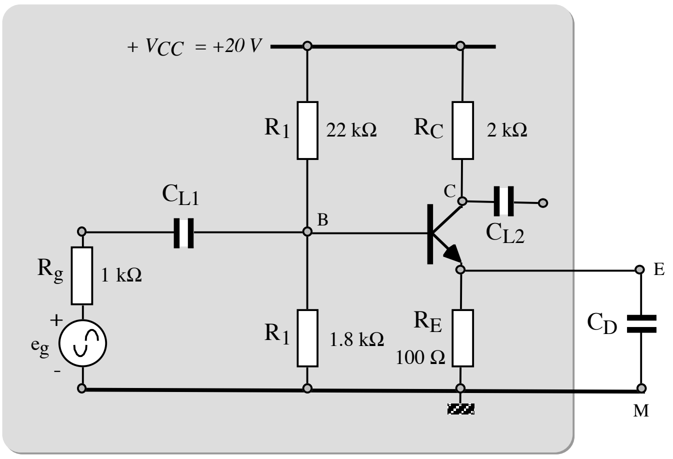



Figure 2 : schéma du montage amplificateur E.C. avec émetteur découplé.

1) Dessiner le schéma équivalent au montage aux petites variations. A la fréquence de travail, on considère négligeables les impédances des condensateurs de liaisons $C_{L1}$ et $C_{L2}$. Par contre il convient de ne pas considérer $C_D$ comme un court-circuit.
On suppose de plus que la résistance $r_{ce}$ du transistor est infinie.

2) Déterminer, en utilisant la méthode de l'ohmmètre, l'expression de la résistance $R_{th}$ du générateur de Thévenin vue par la capacité $C_D$. Faire l'application numérique.

3) En déduire la valeur de la capacité de découplage $C_d$ satisfaisant à :

   a) $F_{déc}$ = -1 dB à f = 50 Hz.
   b) $F_{déc}$ = - 0,1 dB à f = 50 Hz.

Remarque : pour éviter des calculs fastidieux, lorsqu'on se fixe $F_{déc}$ = - 0,1 dB à une pulsation donnée, on utilise la règle simple (donnant une valeur surévaluée) dite « à peu près 1/10 » qui indique alors : $\frac{1}{C\omega} \approx (0.1)R_{th}$

## CORRECTION

### 1° PARTIE : ANALYSE ET GRAPHE ASYMPTOTIQUE DE BODE

1. La cellule d'entrée est un diviseur de tension :

$$v_e = e_g \frac{R_e}{(R_e + R_g) + \dfrac{1}{j\omega C_{L1}}} \qquad \text{soit : } v_e = e_g \frac{R_e}{R_e + R_g} \frac{1}{(1 + \dfrac{1}{j\omega C_{L1}(R_e + R_g)})}$$

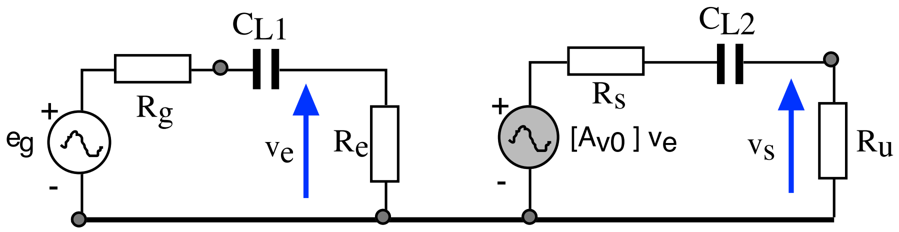



Figure 1

Posons : $\omega_{ce} = \dfrac{1}{C_{L1}(R_g + R_e)}$ pulsation de coupure à -3dB de la cellule ( $f_{ce} = \dfrac{\omega_{ce}}{2\pi}$ ).

$$\boxed{\frac{v_e}{e_g} = \frac{R_e}{R_e + R_g} \frac{1}{(1 - j\dfrac{\omega_{ce}}{\omega})} = \frac{R_e}{R_e + R_g} \frac{1}{(1 - j\dfrac{f_{ce}}{f})}}$$

De la même manière pour la cellule de sortie :

$$\boxed{\frac{v_s}{A_{v0} v_e} = \frac{R_u}{R_s + R_u} \frac{1}{(1 - j\dfrac{\omega_{cs}}{\omega})} = \frac{R_e}{R_e + R_g} \frac{1}{(1 - j\dfrac{f_{cs}}{f})}}$$

Où $f_{cs}$ représente la fréquence de coupure à -3dB de la cellule de sortie. On obtient donc finalement :

$$\boxed{\frac{v_s}{e_g} = [\frac{v_s}{e_g}]_{fréqmoy} [\frac{1}{(1 - j\dfrac{f_{ce}}{f})}] \; [\frac{1}{(1 - j\dfrac{f_{cs}}{f})}]}$$

Avec :

$$[\frac{v_s}{e_g}]_{fréqmoy} = A_{v0} \frac{R_e R_u}{(R_g + R_e)(R_s + R_u)} \qquad f_{ce} = \frac{1}{2\pi(R_g + R_e)C_{L1}} \text{ et } f_{cs} = \frac{1}{2\pi(R_s + R_u)C_{L2}}$$

2. Graphes asymptotiques de Bode de l'étage amplificateur.

   a) Graphe asymptotique du module. Exprimons le module du gain du montage complet :

$$\left\|\frac{v_s}{e_g}\right\| = \left\|\frac{v_s}{e_g}\right\|_{fmoy} \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{f_{ce}}{f}\right)^2}} \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{f_{cs}}{f}\right)^2}}$$

Soit en dB (20log(module) )

$$\boxed{\left\|\frac{v_s}{e_g}\right\|_{dB} = \left\|\frac{v_s}{e_g}\right\|_{fmoy}^{dB} - 10\log(1+\left(\frac{f_{ce}}{f}\right)^2 - 10\log(1+\left(\frac{f_{cs}}{f}\right)^2}$$

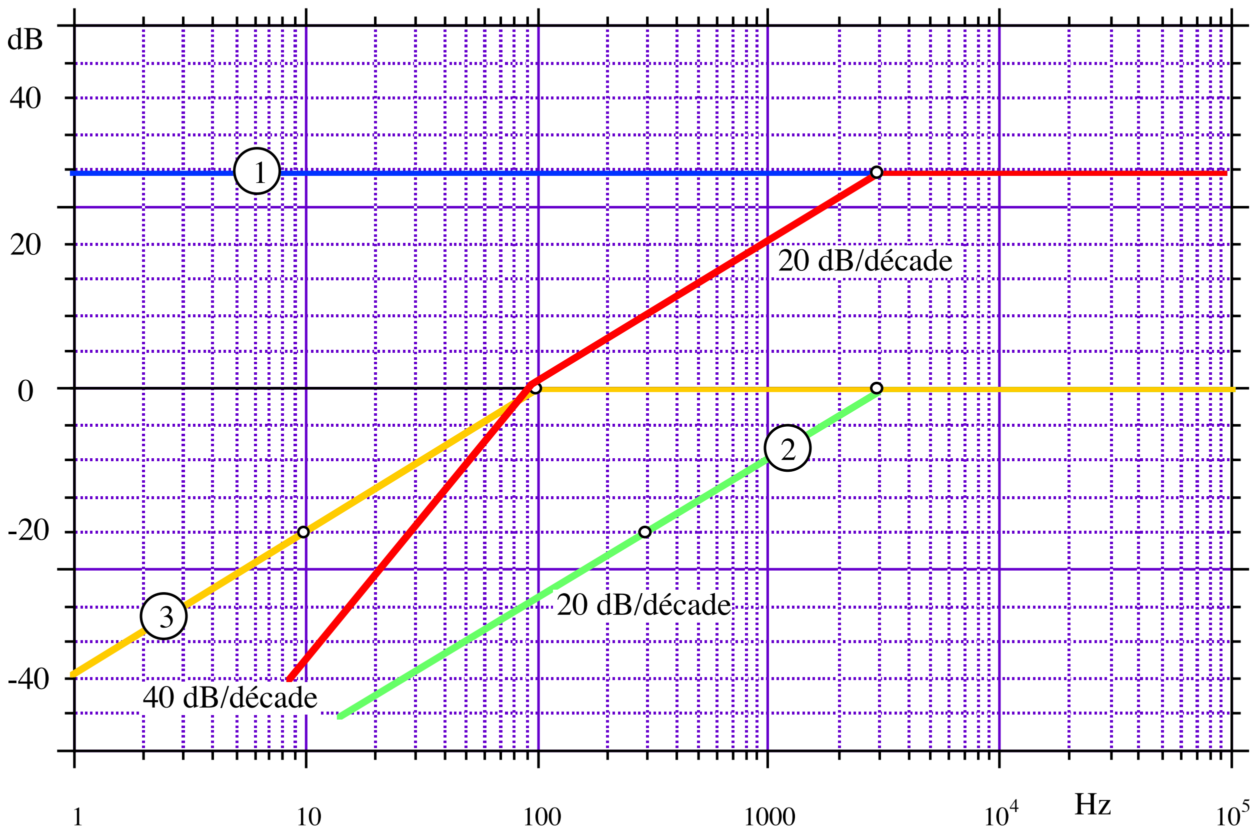



Figure 2 : Graphes asymptotiques de Bode de la réponse en fréquences.

Le tracé 1 correspond à $\left\|\frac{v_s}{e_g}\right\|_{fmoy}^{dB}$ soit 29,54 dB, le tracé 2 correspond à : $-10\log(1+\left(\frac{f_{cs}}{f}\right)^2$

et le tracé 3 à : $-10\log(1+\left(\frac{f_{ce}}{f}\right)^2$

Le graphe complet est la somme des graphes intermédiaires (en rouge sur la figure 2).

La fréquence de coupure à - 3 dB du montage est égale à $f_{cs}$ soit 3kHz.

b) Graphe asymptotique du déphasage Φ de $v_s/e_g$. Expression du déphasage Φ:

$$\Phi(\frac{v_s}{e_g}) = -\pi + Arc\tan(\frac{f_{cs}}{f}) + Arc\tan(\frac{f_{ce}}{f})$$

Le graphe complet (en rouge) est la somme des graphes intermédiaires 1, 2 et 3 (dans l'ordre indiqué par l'expression précédente).

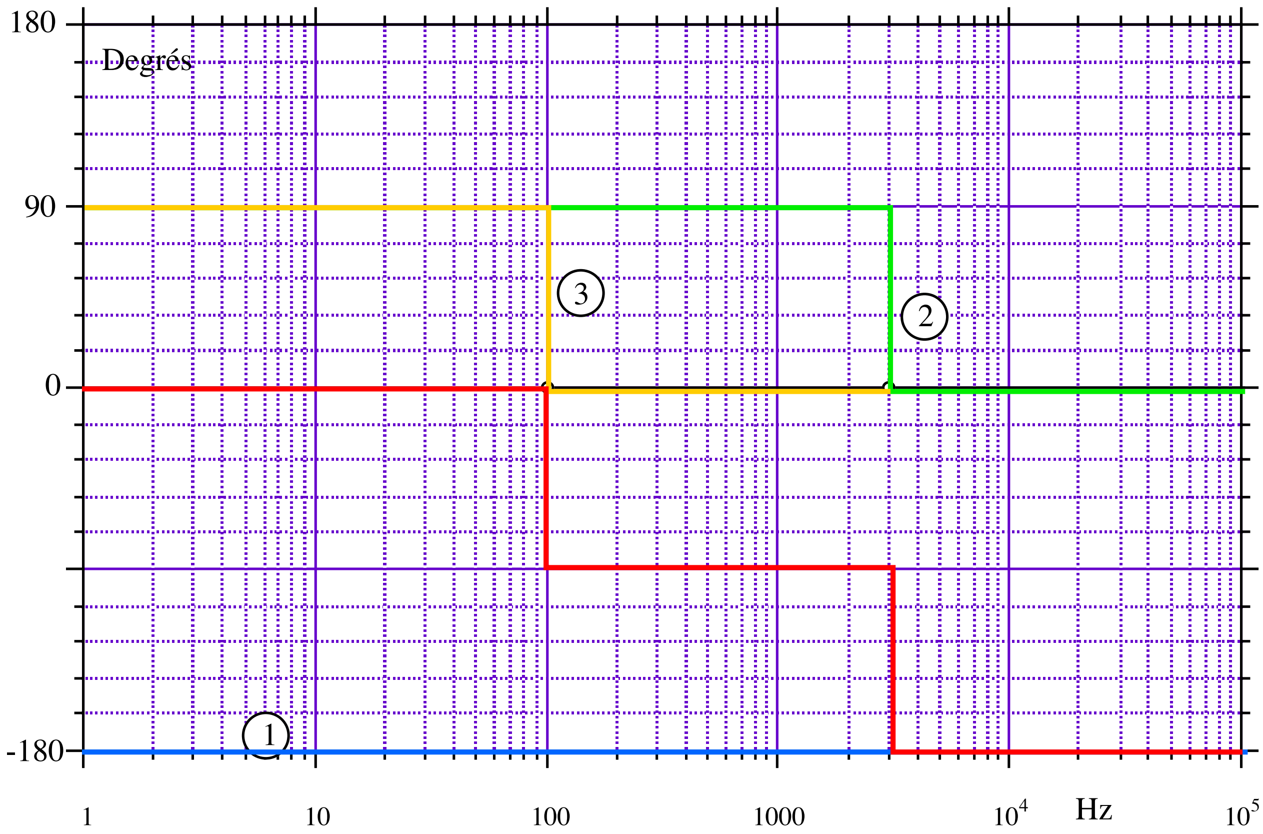



Figure 3 : Graphes asymptotiques de Bode du déphasage de $v_s/v_e$.

**2° PARTIE : SYNTHESE ET CALCUL DES CAPACITES DE LIAISONS**

1. Expression de l'atténuation $A_t$ (dB).

$$A_t(dB) = \left\|\frac{v_s}{e_g}\right\|_{dB} - \left\|\frac{v_s}{e_g}\right\|_{fmoy}^{dB} = -10\log(1+(\frac{f_{ce}}{f})^2 - 10\log(1+(\frac{f_{cs}}{f})^2$$

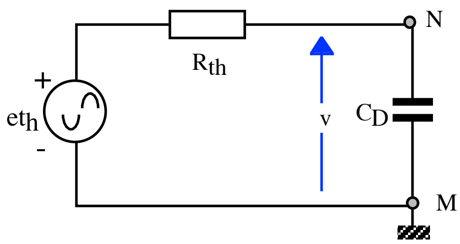
2. On désire que l'atténuation à la fréquence f de 500 Hz soit globalement égale à -3 dB. On doit alors satisfaire la relation précédente pour deux inconnues $f_{ce}$ et $f_{cs}$ . Il faut donc choisir une condition supplémentaire à savoir ici un partage équitable (cependant tout autre partage est possible à condition que la somme soit égale à –3 dB). Le partage étant équitable, on obtient : $f_{ce} = f_{cs}$. Calculons $f_{ce}$ :

$-10\log(1+(\frac{f_{ce}}{f})^2 = -1{,}5$ $\quad (\frac{f_{ce}}{f})^2 = 10^{0.15} - 1$ $\quad f_{ce} = 321$ Hz.

Les expressions des fréquences de coupures : $f_{ce} = \dfrac{1}{2\pi(R_g + R_e)C_{L1}}$ $\quad f_{cs} = \dfrac{1}{2\pi(R_s + R_u)C_{L2}}$

conduisent à : $C_{L1} = 310$ nF et $C_{L2} = 248$ nF.

## CALCUL D'UN CONDENSATEUR DE DECOUPLAGE



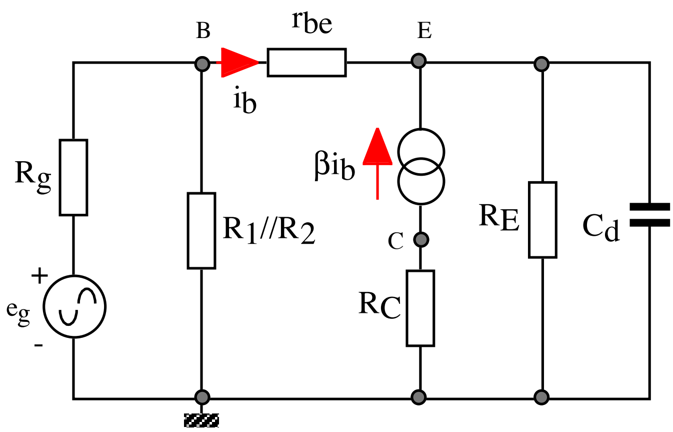

Expression de $F_{déc}$ en fonction de la fréquence, $C_D$ et $R_{th}$ : $\dfrac{v}{e_{th}} = \dfrac{1}{1 + j\omega C_d R_{th}}$

$$F_d = 1 - \frac{1}{1 + j\omega C_d R_{th}} = \frac{1}{1 + \dfrac{1}{j\omega C_d R_{th}}}$$

$$\boxed{\|F_d\|_{dB} = -10\log\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega C_d R_{th})^2}}}$$

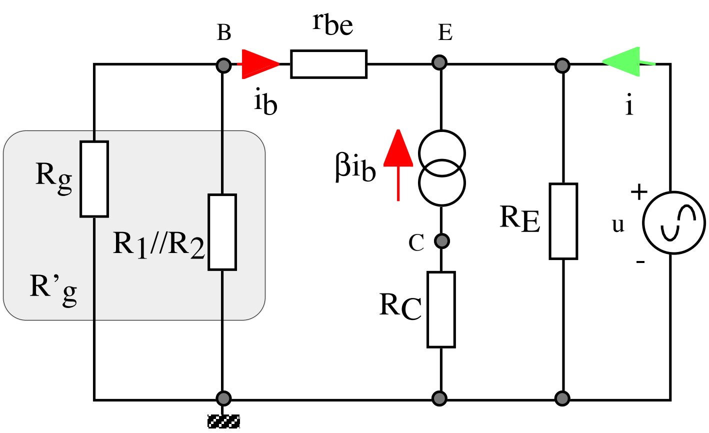
**Exemple de calcul d'une capacité de découplage.**

1) Schéma équivalent au montage aux petites variations.




2) Expression de la résistance $R_{th}$ du générateur de Thévenin vue par la capacité $C_d$.

Pour appliquer la méthode de l'hommètre, on doit court-circuiter $e_g$, enlever $C_d$ et mettre à sa place, un générateur u qui débite un courant i ($R_{th} = \frac{u}{i}$). Le schéma est alors le suivant :




Exprimons la tension u : $u = -i_b(r_{be} + R'_g)$

Equation au nœud E : $i_b(\beta + 1) + i - \frac{u}{R_E} = 0$

On obtient alors : $\frac{i}{u} = \frac{1}{R_E} + \frac{1}{\frac{r_{be} + R'_g}{\beta+1}}$ soit : $\boxed{R_{th} = \frac{u}{i} = R_E // + \frac{r_{be} + R'_g}{\beta+1}}$

Application numérique : $R'_g = 624\ \Omega$ $r_{be} = 361\ \Omega$ $R_{th} = 6.57\ \Omega$.

3) En déduire la valeur de la capacité de découplage $C_d$ satisfaisant à :

c) $F_{déc} = -1$ dB à f = 50 Hz. $C_D = 952\ \mu F$

d) $F_{déc} = -0,1$ dB à f = 50 Hz $C_D = 3.2$ mF