

Traitement de l'information analogique

Chapitre 4 : Le transistor bipolaire

Corinne Berland

Une école de

 CCI PARIS ILE-DE-FRANCE
EDUCATION

 Université
Gustave Eiffel

► Chapitre 1 : Montages en régime sinusoïdal établi

1. Les sources sinusoïdales
2. Régime établi et notation complexe
3. Les phaseurs – relation avec les éléments passifs
4. Lois de Kirchhoff en régime établi
5. Fonctions de transfert
6. Diagrammes de Bode : 1er ordre
7. Fonctions de filtrage

► Chapitre 2 : l'amplificateur opérationnel

1. L'amplificateur opérationnel : principe
2. Fonctionnement en amplificateur
3. Fonctionnement en oscillateur
4. Fonctionnement en comparateur

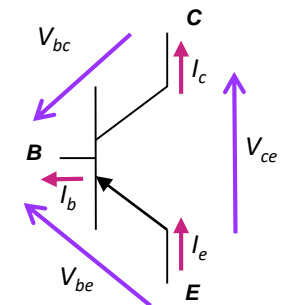
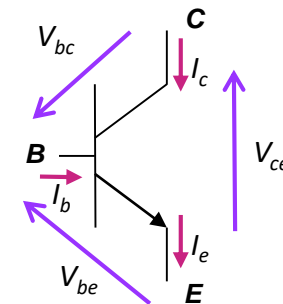
► Chapitre 3 : La diode

1. Le fonctionnement de la diode PN
2. Modèles équivalents de la diode
3. Circuits élémentaires

► **Chapitre 4 : le transistor bipolaire**

1. Le fonctionnement du transistor
2. Modèle équivalent petit signal du transistor
3. L'amplificateur à transistor bipolaire
4. Le transistor bipolaire en commutation

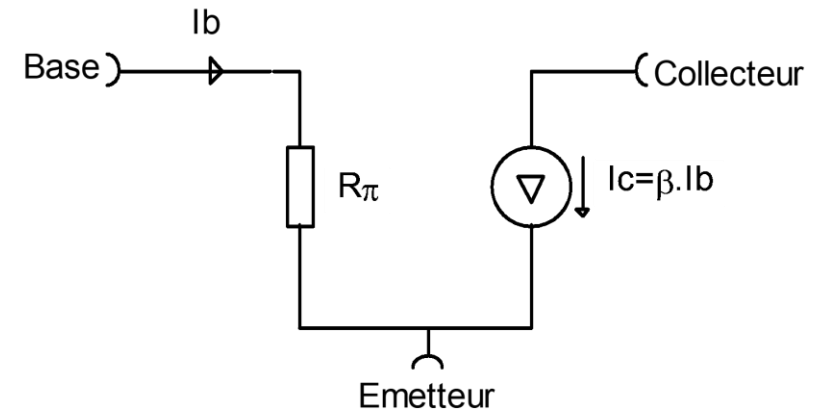
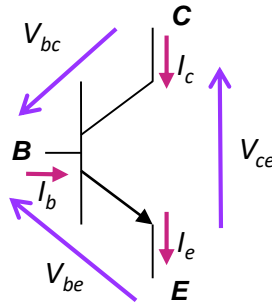
- ▶ Le transistor est un composant incontournable en électronique
 - Il permet la réalisation de nombreux circuits
 - ✓ Amplificateurs
 - ✓ Multiplieurs
 - ✓ Sources de courant
 - ✓ Sources de tension
 - ✓ ... bref : tout
- ▶ Par rapport à l'AOP, il peut fonctionner très haut en fréquence, même très très haut
 - Il existe plusieurs sortes de transistors : JFET, MOSFet, MOSFet, Bipolaire, HBT, ...
- ▶ Dans ce chapitre, on étudie le transistor bipolaire :
 - Il s'agit simplement :
 - ✓ Source de courant commandée en courant
 - ✓ Source de courant commandée en tension



1. Le fonctionnement du transistor

► Introduction au transistor bipolaire et son utilisation

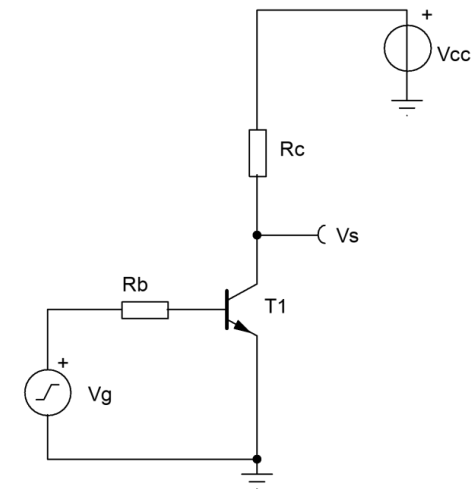
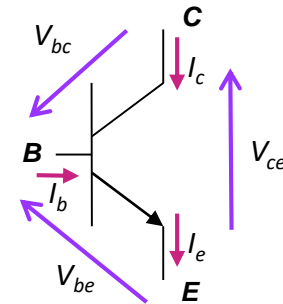
- Le transistor est équivalent à une source de courant commandée en courant
 - ✓ Le courant passe dans la résistance d'entrée du montage
 - ✓ Le gain en courant est très grand : fois 100, fois 200



- ✓ On peut le voir aussi comme source de courant commandée en tension (modèle utilisé en haute fréquence)
- Il y a trois pattes : La base, l'émetteur et le collecteur. L'entrée se fait le plus souvent sur les montages entre les pattes B et E
- Pour qu'il fonctionne il faut le « polariser »
 - ✓ On applique une tension continue entre les pattes B et E, entre la base et l'émetteur
 - ✓ On applique une tension continue sur la patte C, sur le collecteur
- Ensuite on applique une tension sinusoïdale sur l'entrée du montage

1. Le fonctionnement du transistor

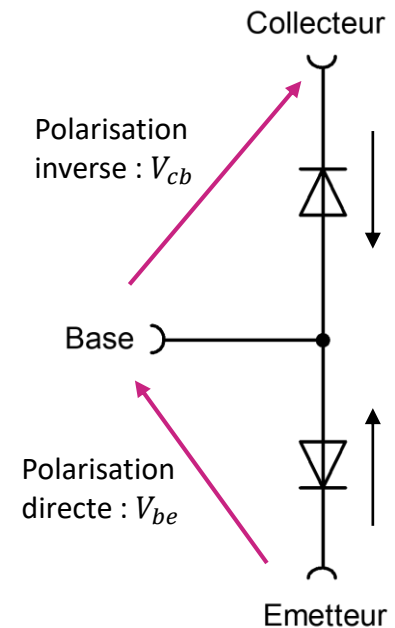
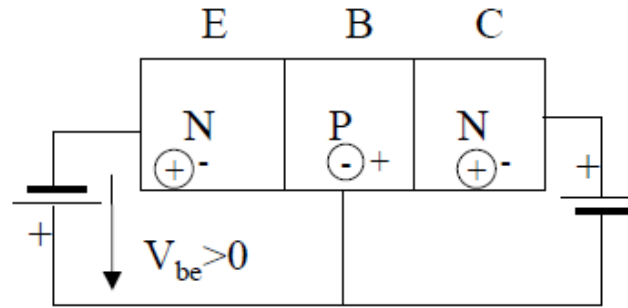
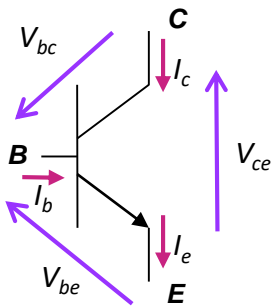
- ▶ Introduction au transistor bipolaire et son utilisation
 - Le principe de fonctionnement en amplificateur
 - ✓ On applique la tension continue sur le collecteur du transistor
 - ❖ Ici via la résistance R_c
 - ✓ Si le générateur en entrée à une composante continue et qu'il délivre une tension sinusoïdale
 - ❖ la sortie est sinusoïdale
 - ✓ Si le générateur en entrée n'a pas de composante continue et qu'il délivre un signal carré
 - ❖ le transistor fonctionne en commutation



1. Le fonctionnement du transistor

► Le transistor bipolaire est simplement constitué de deux diodes PN

- L'une va être polarisée en directe : la diode entre la base et l'émetteur
- L'autre diode est polarisée en inverse

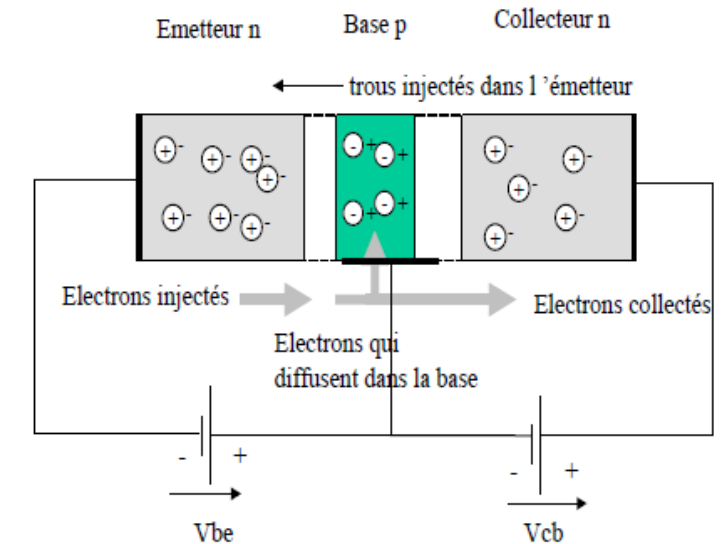


- La jonction PN entre l'émetteur et la base est fortement dopée
 - ✓ La zone N a beaucoup de porteurs libres
- La jonction PN entre la base et le collecteur est faiblement dopée
 - ✓ Il y a peu de porteurs libres
- Le transistor n'est pas symétrique, on ne peut pas inverser l'émetteur et le collecteur

1. Le fonctionnement du transistor

► Le transistor bipolaire est simplement constitué de deux diodes PN

- Sans tension extérieure, les diodes sont à l'équilibre
 - ✓ il y a deux zones libres de charges d'espace
- La jonction B-E est polarisée en directe
 - ✓ Il se crée un courant de diffusion
 - ✓ Un nombre important de porteurs vont dans la base
 - ✓ Cela crée le courant l'émetteur
- La jonction B-C polarisée en inverse
 - ✓ La zone déplétée est large et il y a un fort champs électrique
 - ✓ Les électrons qui arrivent dans la base par diffusion arrivent au bord de cette zone déplétée
 - ✓ Ils sont happés par le champs électrique qui les injecte alors dans le collecteur : cela crée le courant de collecteur
 - ✓ Une partie des électrons se recombinent en pair électron-trou dans la base : cela crée le courant de base



1. Le fonctionnement du transistor

- ▶ Le transistor est régi par des équations qui relient les tensions et les courants

✓ Lorsque le transistor est polarisé correctement :

❖ Le courant dans le collecteur est : $I_c = I_s \exp\left(\frac{V_{be}}{V_T}\right)$,

- avec I_s une constante dépendant du dopage et de la dimension du transistor
- Avec V_T la tension thermique : $V_T = \frac{KT}{q} \approx 26mV$

- Le courant dépend de la tension V_{be} puisqu'il n'est créé que si la diode B-E est passante
- C'est la loi de Shockley pour laquelle on considère $\exp\left(\frac{V_{be}}{V_T}\right) \gg 1$, ce qui est normal puisque la diode B-E est passante et donc $V_{be} \approx 0,6V$

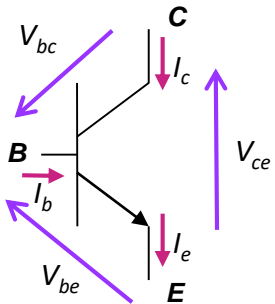
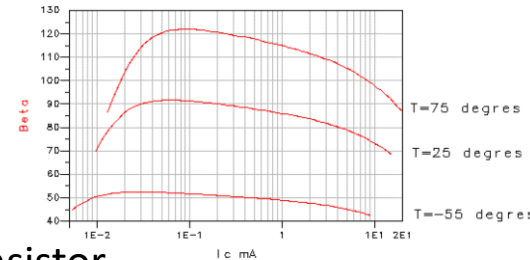
❖ Il y a un gain en courant : $I_c = \beta \cdot I_b$

- $\beta \in [100, 200]$ mais il varie en fonction du courant I_c et de la température

❖ Le courant dans l'émetteur est égal au courant de base plus le courant dans le collecteur

$$I_E = I_C + I_B = (\beta + 1) \cdot I_B = \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) I_C = \frac{I_C}{\alpha_F}$$

- Le gain en courant étant très élevé, $\alpha \approx 1$: on considère la plupart du temps : $I_e \approx I_c$



A connaître
par cœur

1. Le fonctionnement du transistor

► Le réseau de caractéristique du transistor est le suivant :

- On retrouve la caractéristique de la diode d'entrée :

$$I_{Bb} = f(V_{be})$$

- On a la caractéristique du gain en courant du montage :

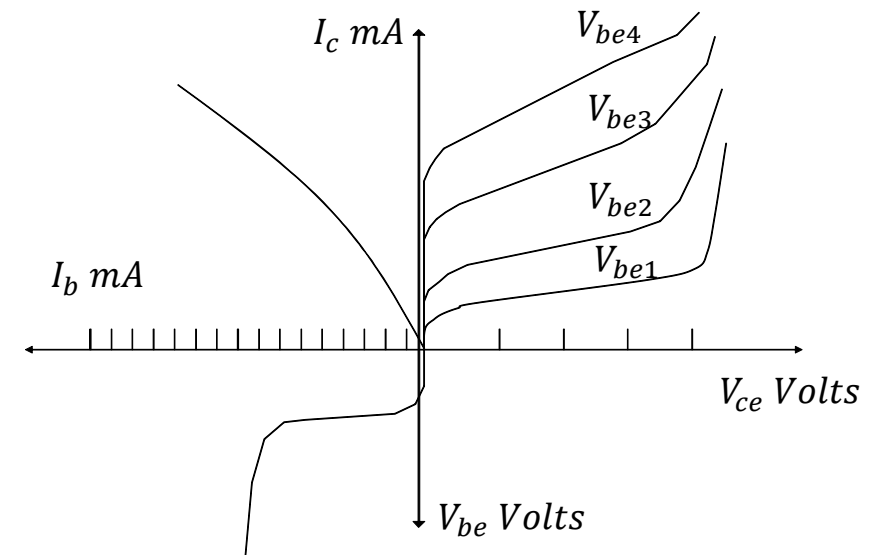
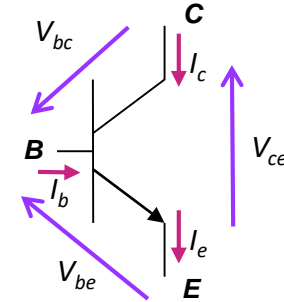
$$I_c = f(I_b)$$

- On a la caractéristique vu de la sortie du montage :

$$I_c = f(V_{ce})$$

- On utilise ce réseau de caractéristique de la même manière que pour la diode

- ✓ Cette caractéristique sert pour le point de fonctionnement du montage : valeurs des tensions et courants continus : V_{be0} , V_{ce0} , I_{b0} , I_{c0}
- ✓ On travaille ensuite en « petit signal » : les modèles utilisés (résistances) correspondent à la linéarisation des caractéristiques autour du point de fonctionnement



1. Le fonctionnement du transistor

► Le réseau de caractéristique et la zone de saturation

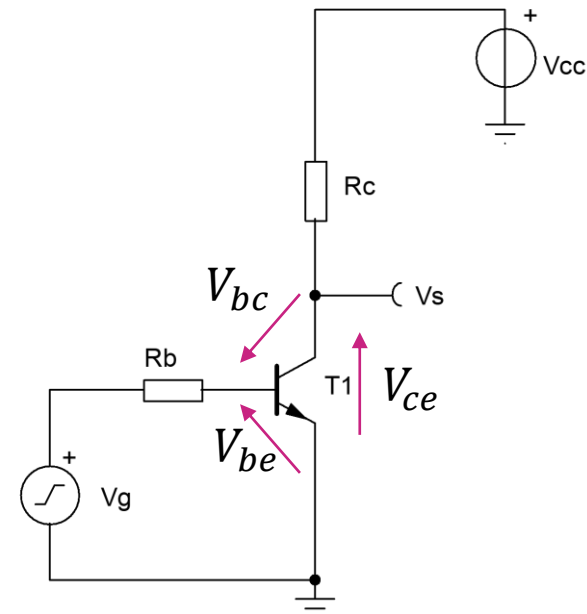
- On note que pour une tension V_{ce} faible, le courant I_c chute : que se passe-t'il au niveau du transistor ?
- Reprenons le montage simple du transistor avec une sortie sinusoïdale
 - ✓ On souhaite avec une signal sinusoïdal en sortie d'amplitude maximale entre 0V et V_{cc}
 - ✓ Pour que le signal soit symétrique, on va polariser le transistor de telle sorte que la valeur moyenne de V_s soit égale à $\frac{V_{cc}}{2}$.
- Mais que se passe-t'il quand V_s diminue et devient quasiment nulle ?
 - ✓ Pour rappel, le transistor fonctionne si la diode B-E est polarisée en direct et la diode B-C en inverse

$$V_{be} > 0.6V, V_{ce} > 0, V_{bc} < 0$$

- ✓ On note sur le circuit que :

$$\begin{aligned} \diamond V_{ce} &= V_s \\ \diamond V_{be} &= V_{ce} + V_{bc} \Rightarrow V_{bc} = V_{be} - V_{ce} \end{aligned}$$

- ✓ Lorsque V_s diminue, donc V_{ce} diminue, V_{bc} devient positive : la diode B-C n'est plus polarisée en inverse
 - ❖ Il n'y a plus injection de porteurs de l'émetteur vers le collecteur : l'effet transistor ne fonctionne plus
 - ❖ Le gain en courant du montage chute
 - ❖ La diode ne devient jamais passante, le jonction reste bloquée ($V_{bc} = 0.4V$)
 - ❖ La tension V_{ce} ne descend pas en dessous de 0,2V

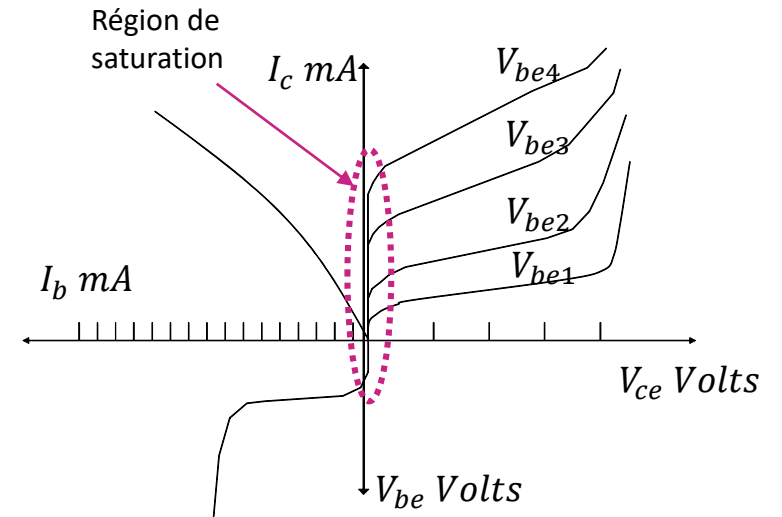
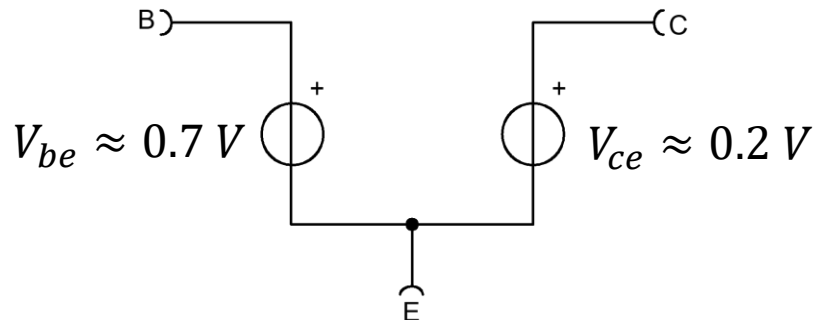


1. Le fonctionnement du transistor

► Le réseau de caractéristique et la zone de saturation

■ Lorsque le transistor est en zone de saturation

- ✓ La tension V_{ce} se bloque à $0.2V$
- ✓ Le gain en courant du transistor chute. On définit alors un $\beta_{forcé}$ qui est bien plus faible que le gain en courant normal
- ✓ Son schéma équivalent est le suivant :

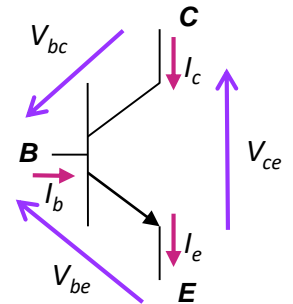


- ❖ Lorsque l'on fait travailler le transistor comme un commutateur, on met souvent le transistor en saturation
 - Le courant circule même si il est plus faible
 - Il ne chauffe pas et ne dissipe pas beaucoup de chaleur : $P = V_{ce0} \cdot I_{c0}$

1. Le fonctionnement du transistor

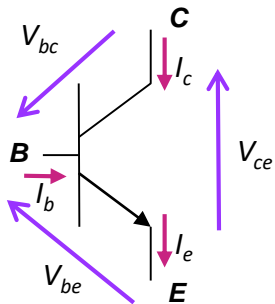
► Le claquage des diodes constituant le transistor

- Le transistor étant constitué de diodes, elles peuvent entrer en claquage sur une tension inverse trop importante est appliquée
 - ✓ Il y a trois tension de claquage
- Tension de claquage base collecteur : V_{BC0}
 - ❖ Elle est très élevée
 - Heureusement car cette diode est toujours en inverse....
 - ❖ Sur le 2N2222 : $V_{cb0} = 75\text{ V}$
- Tension de claquage collecteur émetteur : V_{CE0}
 - ❖ Moins élevée que la précédente
 - ❖ Sur le 2N2222 : $V_{ce0} = 40\text{ V}$
 - ❖ Sur des fortes amplitudes, cela entraine des distorsions du signal en sortie
- Tension de claquage base émetteur : V_{BE0}
 - ❖ Elle entraine la destruction du transistor
 - ❖ Relativement peu élevée à cause du dopage de l'émetteur
 - ❖ Sur le 2N2222 : $V_{be0} = 6\text{ V}$

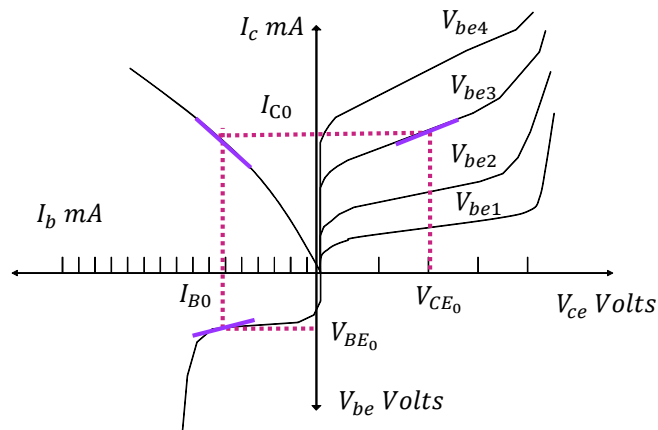


2. Modèle équivalent petit signal

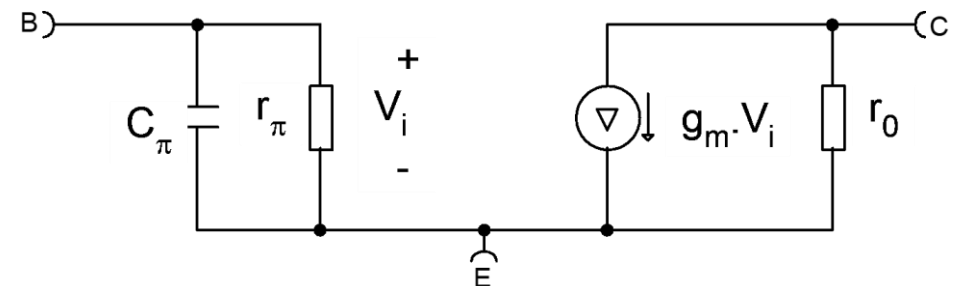
- Comment fait-on pour calculer les montages avec un transistor bipolaire ?
 - Comme pour les diodes, on cherche un modèle équivalent en petit signal



- ❖ Le schéma équivalent sert lorsque le signal en entrée est sinusoïdal et de faible amplitude
- ❖ Le transistor est dit polarisé : la diode E-B est passante, la diode C-B est bloquée
- ❖ Pour le trouver, on va linéariser les courbes de la caractéristique au point de polarisation continu du composant
 - Point de fonctionnement : $V_{BE_0}, V_{CE_0}, I_{B_0}, I_{C_0}$



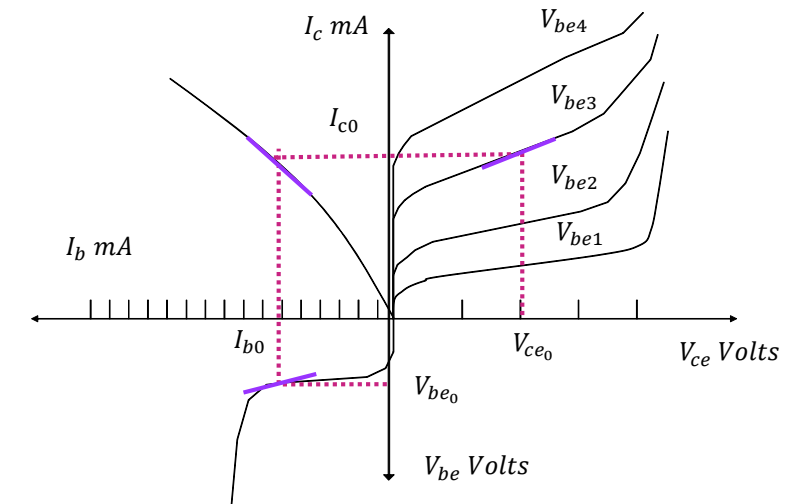
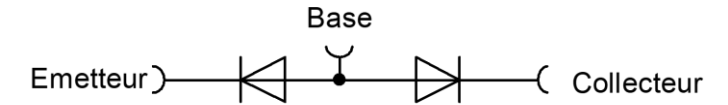
Modèle équivalent du transistor « petit signal »



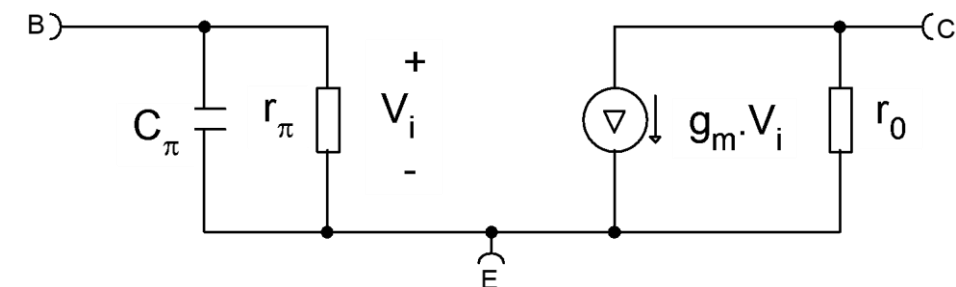
2. Modèle équivalent petit signal

► Quels sont les éléments du modèle équivalent ?

- La capacité C_π prend en compte l'effet capacitif de la diode E-B
- La résistance r_π est issue de la linéarisation de la courbe : $I_b = f(V_{be})$
- La transconductance g_m correspond à la linéarisation de la fonction $I_c = f(V_{be})$
 - ✓ On utilise la loi de Shockley non représentée sur la caractéristique
 - ✓ Le modèle de la transconductance est plus exact en fréquence que le modèle avec le gain en courant
- La résistance r_o correspond à la résistance de sortie du transistor et est issue de la linéarisation de la courbe : $V_{ce} = f(I_c)$



Modèle équivalent du transistor « petit signal »



2. Modèle équivalent petit signal

► Les éléments du modèle petit signal du transistor : la transconductance g_m en Siemens

- Elle est obtenue à partir de la linéarisation de la fonction $I_c = f(V_{be})$ autour du point de fonctionnement (I_{c0}, V_{be0})

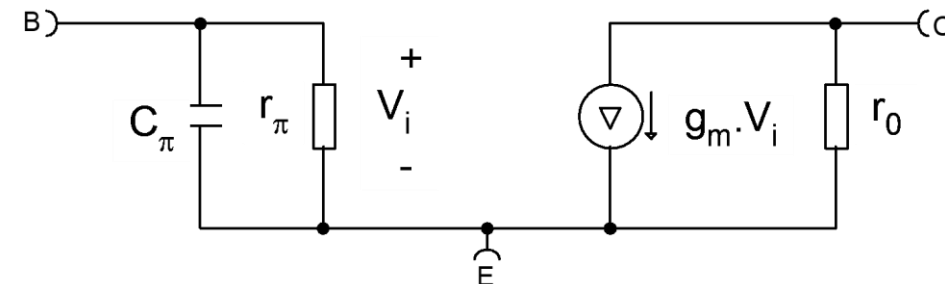
$$g_m = \left. \frac{\partial I_c}{\partial V_{be}} \right|_{I_{c0}, V_{BE0}}$$

- On utilise la loi de Shockley : $I_c = I_s \exp\left(\frac{V_{be}}{V_T}\right)$
- Le calcul donne alors :

$$g_m = \left. \frac{\partial I_c}{\partial V_{be}} \right|_{I_{c0}, V_{BE0}} = \frac{1}{V_T} \cdot I_s \exp\left(\frac{V_{be}}{V_T}\right) \Big|_{I_{c0}, V_{BE0}} = \frac{I_c}{V_T} \Big|_{I_{c0}, V_{BE0}} = \frac{I_{c0}}{V_T}$$

- On obtient, en se rappelant que : $V_T = \frac{K.T}{q} \approx 26 \text{ mV}$

$$g_m = \frac{I_{c0}}{V_T} = \frac{q I_{c0}}{KT} \text{ Siemens}$$



2. Modèle équivalent petit signal

► Les éléments du modèle petit signal du transistor : le condensateur C_π

- Elle prend en compte le temps de transit des charges entre l'émetteur et la base
- Elle est la somme de deux capacités : $C_\pi = C_b + C_{je}$
- ✓ C_b correspond à l'effet capacitif de la base et donc du temps de transit des porteurs :

$$C_b = \frac{\Delta Q}{\Delta V_{be}}$$

❖ Sachant que $Q = \tau_F I_C$, avec τ_F le temps de transit

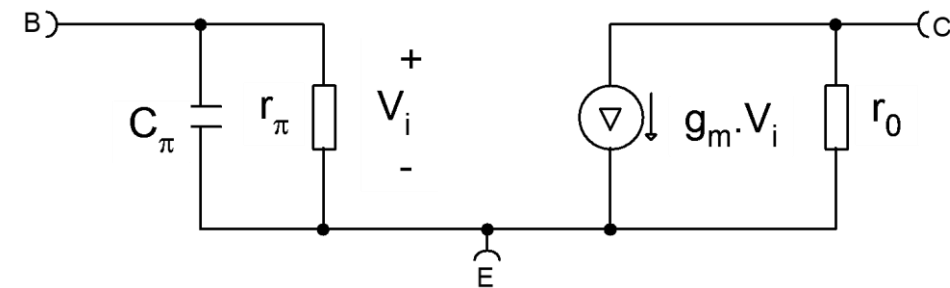
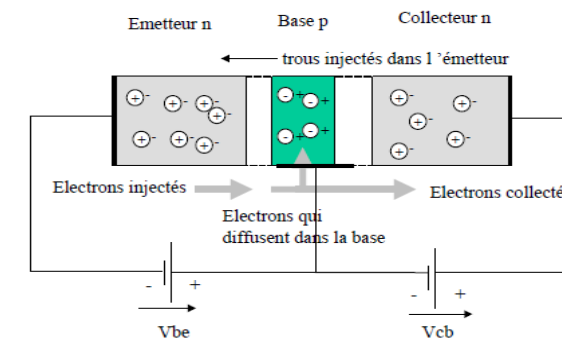
$$\Delta Q = \tau_F \cdot \Delta I_C \Rightarrow C_b = \tau_F \cdot \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{be}} = \tau_F \cdot g_m$$

✓ C_{je} correspond à la capacité de jonction émetteur base

$$C_{je} = \frac{C_{je0}}{\sqrt{\left(1 - \frac{V_{be}}{\phi_0}\right)^m}}$$

❖ C_{je0} est la capacité de jonction quand V_d est nulle

❖ ϕ_0 est la tension de contact entre 0,6V et 0,9V, lorsque la diode est à l'équilibre



2. Modèle équivalent petit signal

► Les éléments du modèle petit signal du transistor : le gain en courant et la résistance r_π

- Le gain en courant du transistor est obtenu par linéarisation de la fonction :

$$I_c = f(I_b)$$

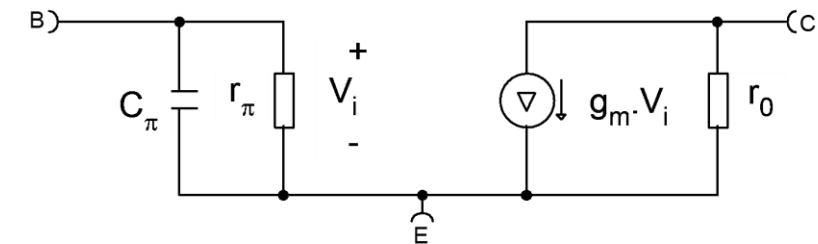
✓ Le gain en courant est caractérisé en continu : $I_{C0} = \beta_F \cdot I_{B0}$

✓ Le gain en courant petit signal est alors : $\beta_0 = \left. \frac{\partial I_c}{\partial I_b} \right|_{I_{B0}, I_{C0}}$

❖ On considèrera dans les exercices $\beta_F \approx \beta_0$, on appellera le gain en courant : β

- La résistance r_π est la résistance vue de l'entrée du transistor

✓ Elle provient de la linéarisation de $I_b = f(V_{be})$



$$r_\pi = \left. \frac{\partial V_{be}}{\partial I_b} \right|_{I_{B0}, I_{C0}} = \left. \frac{\partial V_{be}}{\partial I_c} \frac{\partial I_c}{\partial I_b} \right|_{I_{B0}, I_{C0}} = \frac{\beta_0}{g_m}$$

2. Modèle équivalent petit signal

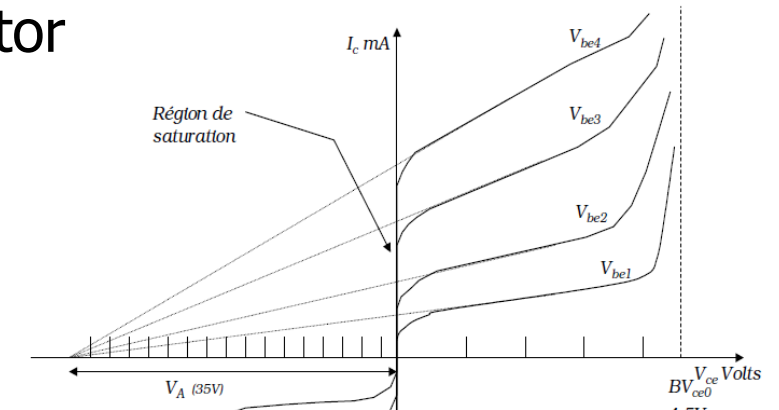
► Les éléments du modèle petit signal du transistor : la résistance de sortie r_0

- La résistance r_0 est la résistance de sortie du transistor

✓ Elle provient de la linéarisation de $I_c = f(V_{ce})$

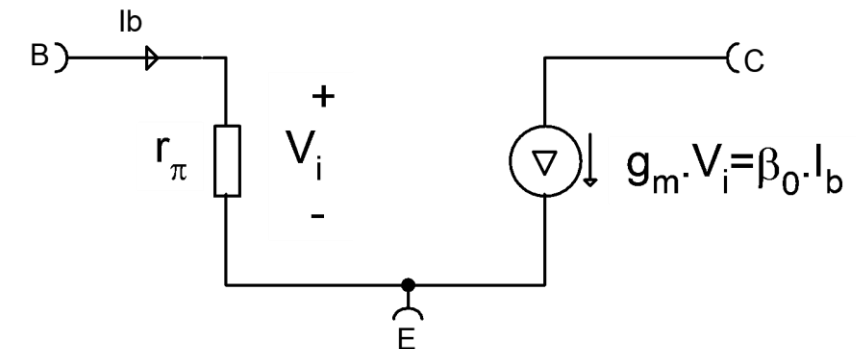
$$r_0 = \left. \frac{\partial V_{ce}}{\partial I_{C0}} \right|_{I_{C0}} = \frac{V_A}{I_{C0}}$$

✓ La tension V_A s'appelle la tension d'Early



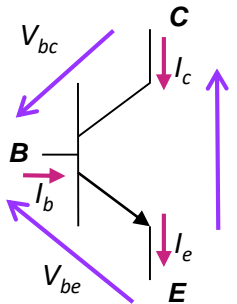
► Au final, le modèle que l'on utilise...

- ✓ C_π est généralement considéré pour un calcul en HF
- ✓ r_0 est souvent négligé car très grand



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

- ▶ Le transistor bipolaire à trois « pattes » : La base, l'émetteur et le collecteur
 - Selon où on place l'entrée et la sortie, on réalise des amplificateurs différents
 - Montage émetteur commun
 - ✓ L'entrée est sur la base, la sortie sur le collecteur, l'émetteur est à la masse
 - Montage collecteur commun
 - ✓ L'entrée est sur la base, la sortie sur l'émetteur et le collecteur est à la masse du point de vue alternatif
 - Montage base commune
 - ✓ L'entrée est sur l'émetteur, la sortie sur le collecteur et la base à la masse du point de vue alternatif

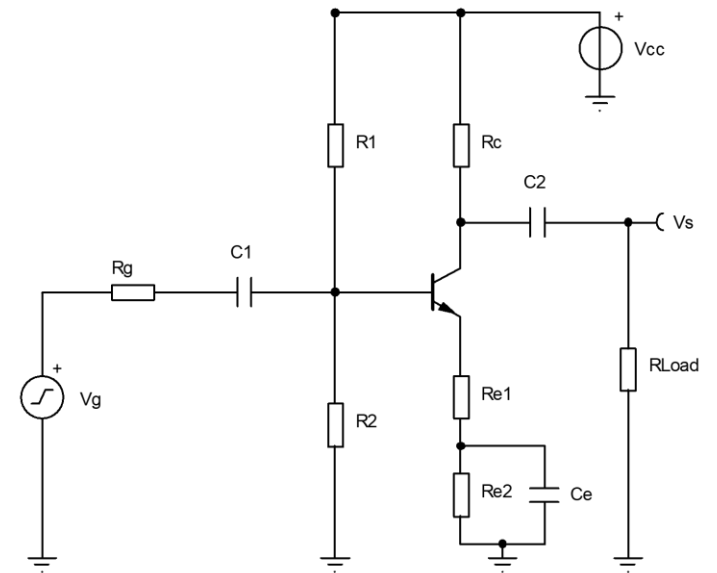
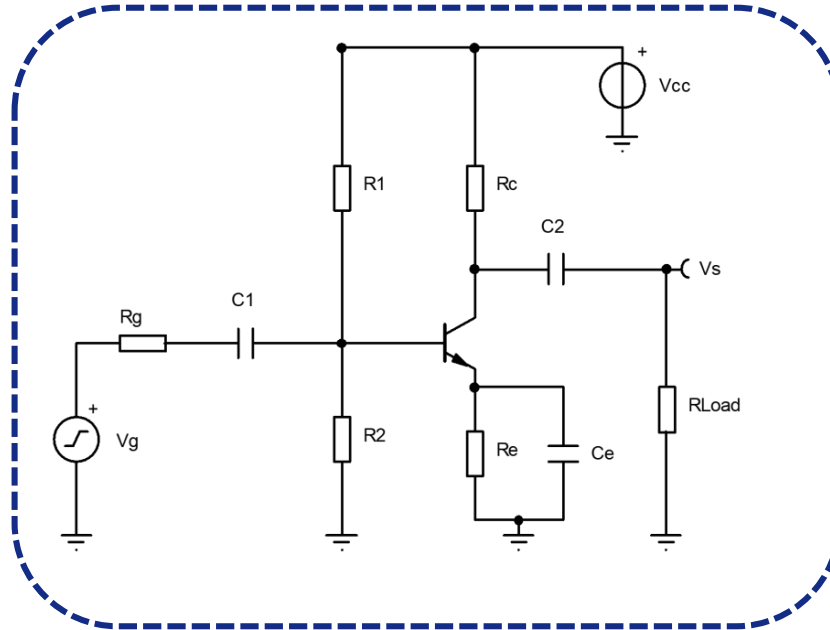
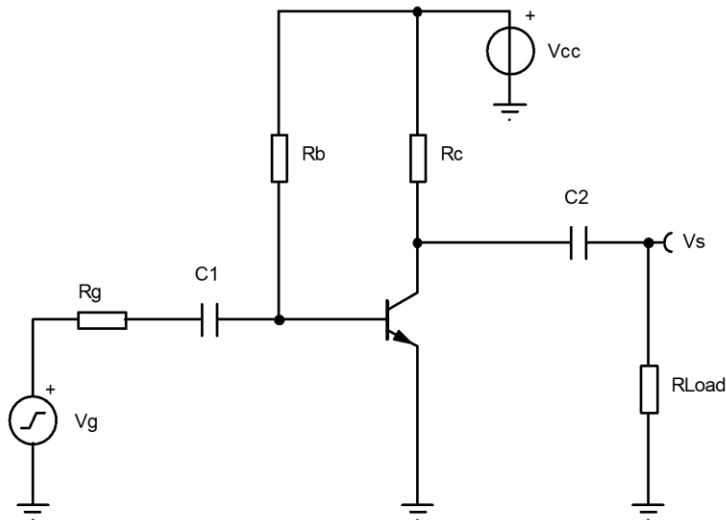


3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun

- Le montage à émetteur commun est un montage où l'entrée se fait sur la base du transistor, la sortie sur le collecteur

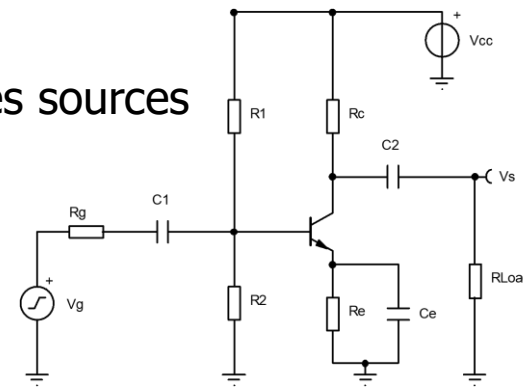
✓ Les versions du montage :



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun

- Pour faire l'étude théorique d'un montage à transistor, il faut appliquer le théorème de superposition
 - ✓ On étudie le montage en ne gardant que les sources continues : fonctionnement DC :
 - ❖ Cela permet de dimensionner les valeurs des composants passif en fonction du point de fonctionnement voulu
 - Valeur des courants et tensions au niveau du transistor en continu : polarisation
 - ✓ Ensuite on étudie le fonctionnement du montage en éteignant « théoriquement » les sources continues, et en allumant les sources sinusoïdales : fonctionnement AC
 - ❖ Le transistor est alors remplacé par son schéma équivalent petit signal
 - ❖ Cela permet de calculer les performances du montage en régime sinusoïdal établi :
 - Fonction de transfert, gain, impédance d'entrée, impédance de sortie, excursion maximale du signal de sortie

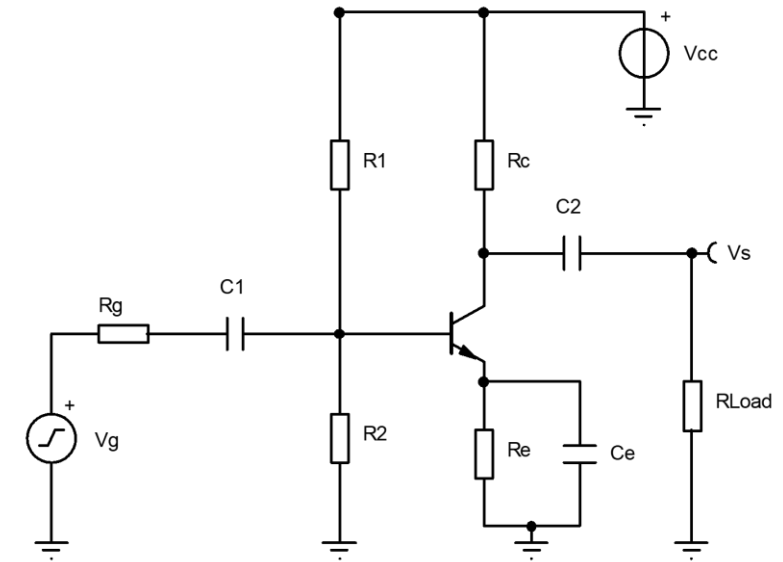


3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun

- Le transistor doit être polarisé pour que la diode B-E soit passante et la diode B-C bloquée
 - ✓ On applique une tension continue sur la base de l'émetteur pour que la tension base-émetteur en continu soit aux alentours de $0.6 - 0.7V$: V_{be_0}
 - ✓ On met une tension d'alimentation au niveau du collecteur, via une résistance R_c pour fixer la tension entre le collecteur et l'émetteur à une valeur supérieur à V_{sat} : V_{CE_0}
 - ✓ Cela va entrainer la création des courants dans la base et le collecteur : I_{B0}, I_{C0}
 - ✓ On a bien la diode B-C bloquée:

$$V_{BC_0} = V_{BE_0} - V_{CE_0} < 0,4V$$



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

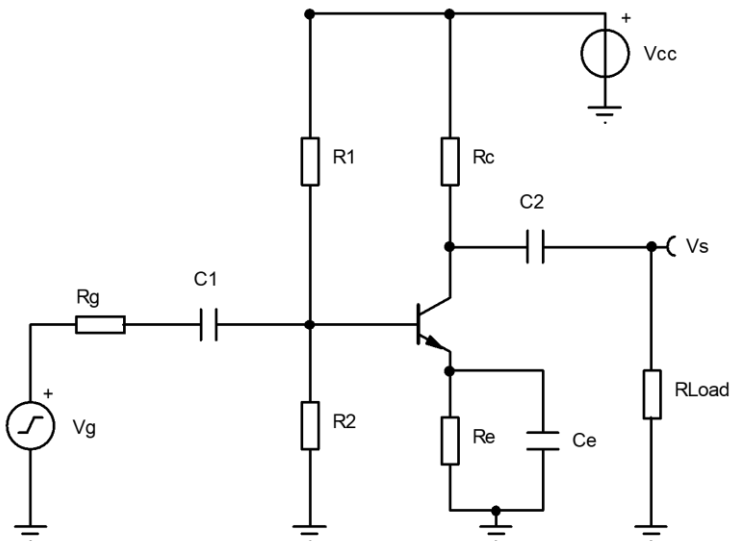
► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

✓ On commence par étudier le montage en continu : analyse DC

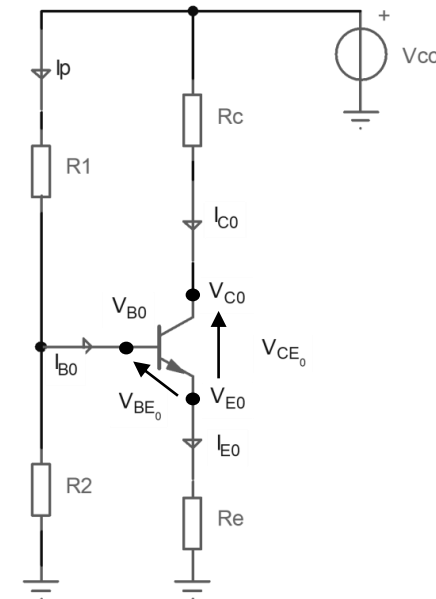
❖ On éteint les sources sinusoïdales

❖ Les condensateurs sont des circuits ouverts

- Les condensateurs C_1 et C_2 permettent l'isolation de la polarisation continue
 - Ce sont des condensateurs de liaison



⇒



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

- Les valeurs de V_{CC} , V_{BE0} , V_{Re} , I_{C0} , I_p et β sont données

✓ Il faut en déduire les valeurs des résistances

✓ Il faut juste faire des lois des mailles

$$\diamond V_{CC} = V_{R_1} + V_{R_2} = R_c \cdot I_{C0} + V_{CE0} + R_e \cdot I_{E0}$$

$$\diamond V_{CC} = R_1 \cdot I_p + R_2(I_p - I_{B0})$$

$$\diamond V_{Re} = R_e \cdot I_{E0}$$

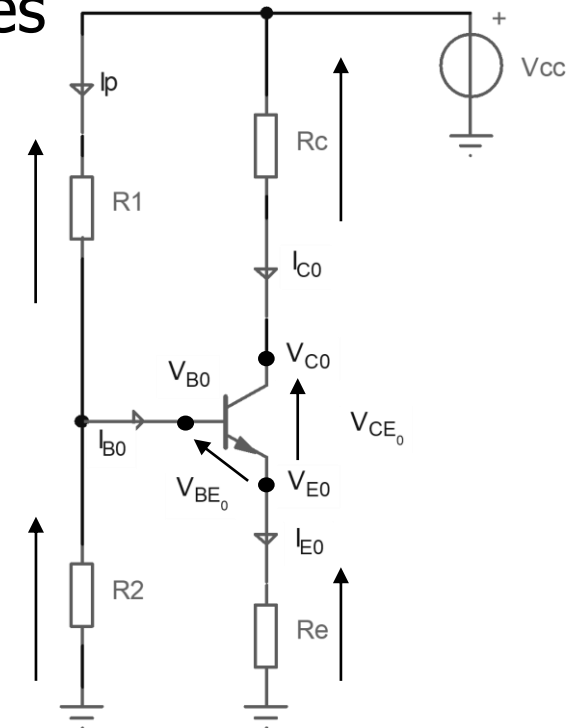
$$\diamond V_{R2} = R_2(I_p - I_{B0}) = V_{BE0} + V_{Re}$$

✓ On fait des hypothèses simplificatrices suivantes :

$$\diamond \text{Avec } \beta \geq 100, I_{E0} \approx I_{C0}$$

$$\diamond \text{Pour que le système soit stable en température : } I_p \gg I_{B0}$$

✓ On en déduit simplement les valeurs des composants



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

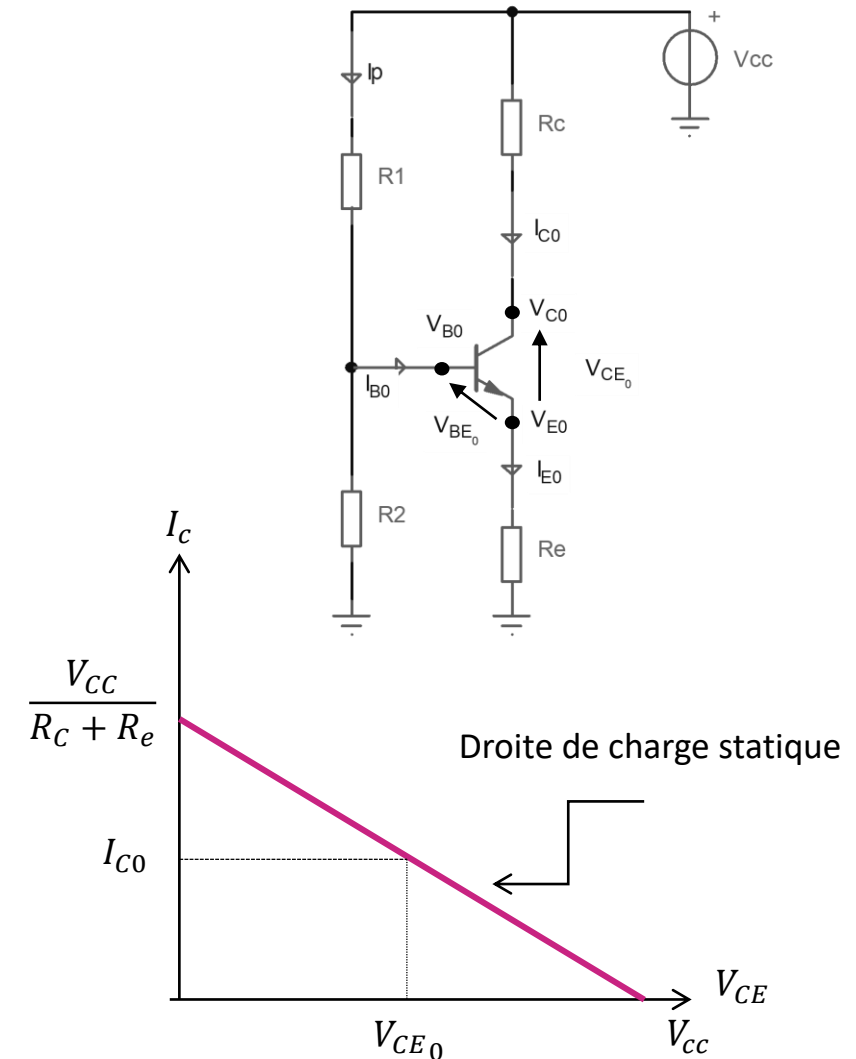
- ✓ On trace sur le réseau de caractéristique l'équation de sortie du montage en continu

$$I_C = f(V_{CE})$$

- ✓ Il s'agit de la **Droite de charge statique**
 - ❖ La loi des mailles en sortie du montage donne

$$V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE} + R_E \cdot I_C \Rightarrow I_C = \frac{(V_{CC} - V_{CE})}{R_C + R_E}$$

- ✓ Elle permet de voir l'évolution du point de polarisation en cas de variation
 - ❖ Si V_{CE_0} augmente, I_{C_0} diminue



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

■ Exemple : calcul des composants du montage

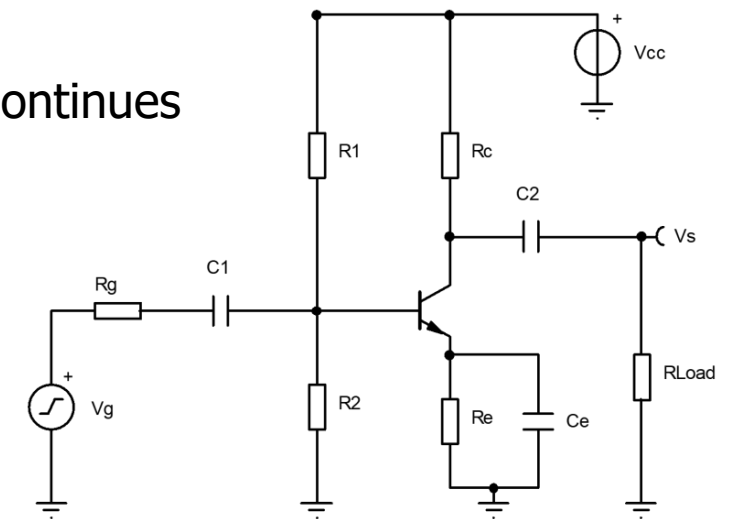
❖ $I_{C0} = 2mA, V_{BE0} = 0.6V, V_{CE0} = 6.75V, \beta = 150, I_p = 1mA, V_{RE} = 1.45V, V_{CC} = 15V, R_{Load} = 20\text{ k}\Omega, R_g = 50\text{ }\Omega$

✓ Première chose à faire :

❖ On redessine le montage en ne gardant que les sources continues

✓ Et ensuite :

- ❖ On indique les courants
- ❖ On indique les tensions
- ❖ On indique les potentiels

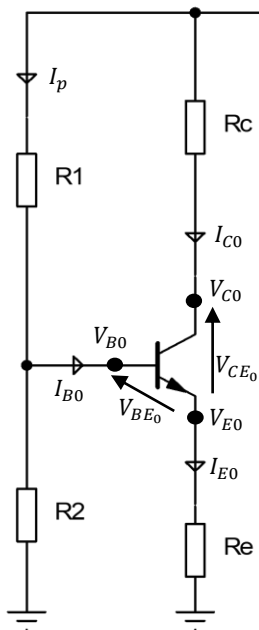


3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

■ Exemple : calcul des composants du montage

❖ $I_{C0} = 2mA, V_{BE0} = 0.6V, V_{CE0} = 6.75V, \beta = 150, I_p = 1mA, V_{Re} = 1.5V, V_{CC} = 15V, R_{Load} = 20k\Omega, R_g = 50\Omega$



○ On note que :

- $V_{B0} = V_{Re} + V_{BE0} = 1,5 + 0,6 = 2,1V$
- $V_{E0} = V_{Re} = 1,5V$
- $V_{C0} = V_{Re} + V_{CE0} = 1,5 + 6,75 = 8,25V$

○ On calcule les courants et on vérifie les hypothèses

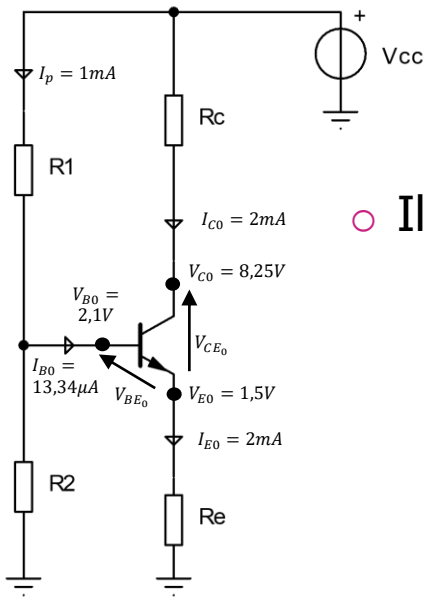
- $I_{B0} = \frac{I_{C0}}{\beta_F} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{150} = 13,34\mu \ll I_p = 0,1mA$
- $I_{E0} = I_{C0} + I_{B0} = \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) I_{C0} = 1,007 \cdot I_{C0} = 2,014mA \approx I_{C0}$

3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

■ Exemple : calcul des composants du montage

❖ $I_{C0} = 2mA, V_{BE0} = 0.6V, V_{CE0} = 6.75V, \beta = 150, I_p = 1mA, V_{RE} = 1.5V, V_{CC} = 15V, R_{Load} = 20 k\Omega, R_g = 50 \Omega$



○ Il suffit ensuite de calculer les valeurs des résistances

- La première équation évidente : $V_{RE} = R_e \cdot I_{E0} \approx R_e \cdot I_{C0} \Rightarrow R_e = \frac{V_{RE}}{I_{C0}} = \frac{1,5}{2 \cdot 10^{-3}} = 750 \Omega$
- Maille de sortie : $V_{CC} = R_C \cdot I_{C0} + V_{CE0} + V_{RE} \Rightarrow R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE0} - V_{RE}}{I_{C0}} = \frac{15 - 6,75 - 1,5}{2 \cdot 10^{-3}} = 3375 \Omega$
- En entrée : $V_{R2} \approx R_2 \cdot I_p = V_{BE0} + V_{RE} \Rightarrow R_2 = \frac{V_{BE0} + V_{RE}}{I_p} = \frac{0,6 + 1,5}{10^{-3}} = 2100 \Omega$
- En entrée : $V_{RC} = R_C \cdot I_p = V_{CC} - V_{B0} \Rightarrow R_C = \frac{V_{CC} - V_{B0}}{I_p} = \frac{15 - 2,1}{10^{-3}} = 12900 \Omega$

3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

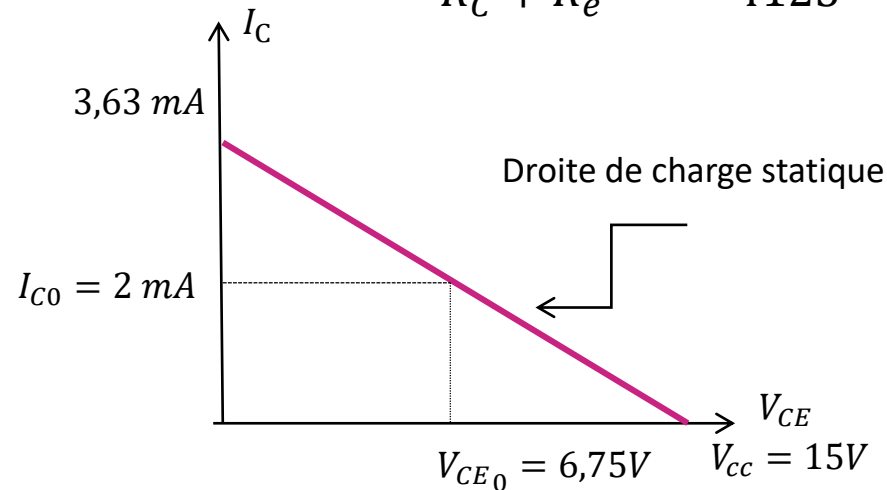
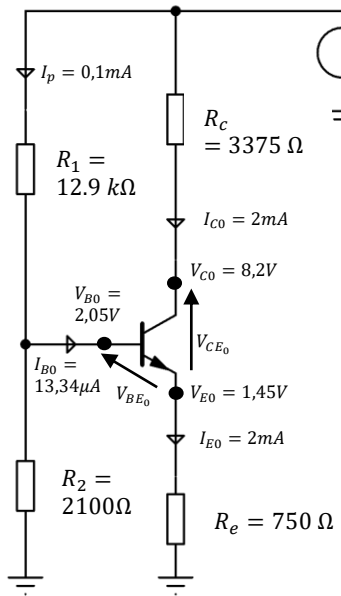
■ Exemple : La droite de charge statique

❖ $I_{C0} = 2mA, V_{BE0} = 0.6V, V_{CE0} = 6.75V, \beta = 150, I_p = 1mA, V_{RE} = 1.45V, V_{CC} = 15V, R_{Load} = 20k\Omega, R_g = 50\Omega$

○ La droite de charge statique se trace avec l'équation : $I_C = f(V_{CE})$

○ La maille de sortie donne :

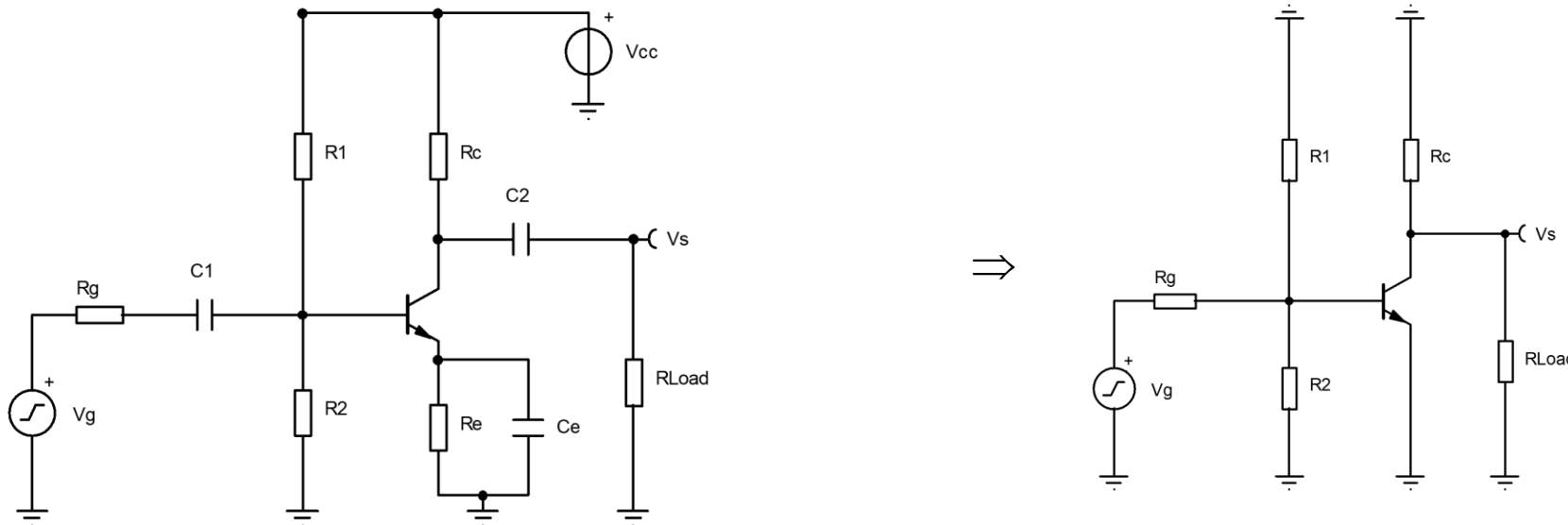
$$V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE} + R_e \cdot I_C \approx I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C + R_e} = \frac{(15 - V_{CE})}{4125}$$



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

- ✓ On étudie ensuite le circuit du point de vue sinusoïdal petit signal : analyse AC
 - ❖ On éteint les sources continues : les sources de tension deviennent des fils
 - ❖ Les condensateurs sont des courts circuits
 - Les condensateurs C_1 et C_2 doivent laisser passer la tension sinusoïdale
 - leur impédance est faible à la fréquence de fonctionnement du montage : $Z_C \approx 0$



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

- En mode AC, on commence par tracer la droite de charge dynamique

- ✓ La droite de charge dynamique est le tracé de la droite : $i_c = f(v_{ce})$
- ✓ Le courant i_c et la tension v_{ce} sont les composantes alternatives du courant de collecteur et de la tension collecteur-émetteur

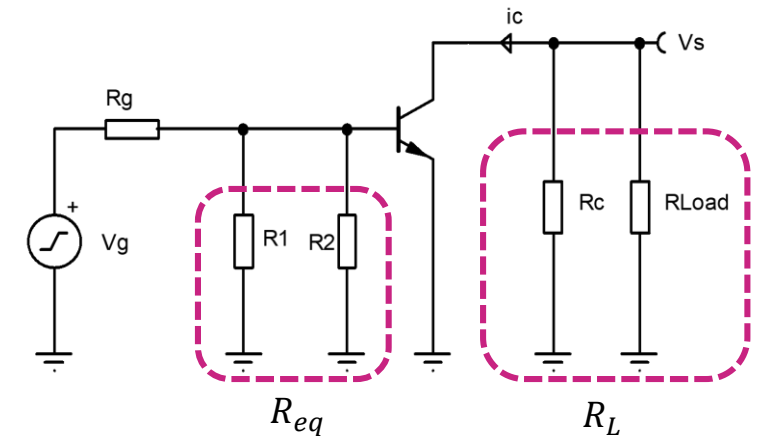
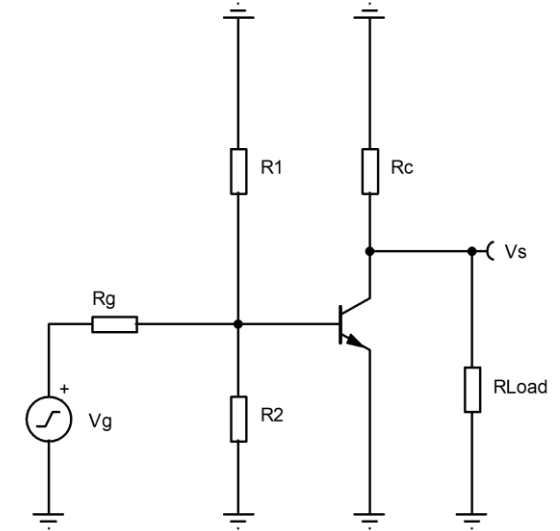
$$I_C = I_{C0} + i_c$$

$$V_{CE} = V_{CE0} + v_{ce}$$

- ✓ La droite de charge dynamique donne l'excursion maximale possible que l'on peut avoir pour la tension V_{ce} du transistor, et donc en déduire l'excursion maximale possible pour le signal de sortie
- ✓ Pour faire le calcul, on redessine le montage

❖ R_{eq} la résistance équivalente à R_1 en parallèle à R_2 : $R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

❖ R_L La résistance équivalent à R_c en parallèle à R_{Load} : $R_L = \frac{R_c \cdot R_{Load}}{R_c + R_{Load}}$



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

- En mode AC, on trace la droite de charge dynamique

✓ La loi des mailles en sortie du transistor est :

$$v_{ce} + v_{R_L} = 0$$

$$v_{ce} = -R_L \cdot i_c \Rightarrow i_c = -\frac{v_{ce}}{R_L}$$

✓ On trace cette courbe dans le même repère que pour la droite de charge statique

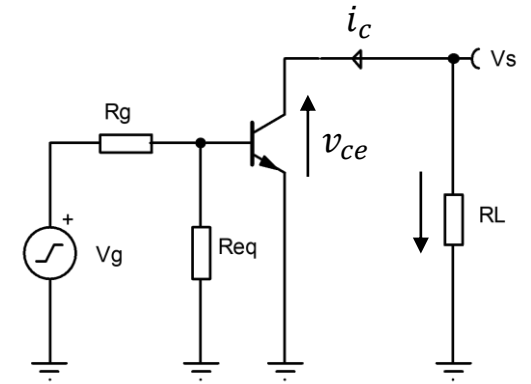
❖ Pour le tracé, le plus facile est de réutiliser le fait que :

$$I_C = I_{C0} + i_c \Rightarrow i_c = I_C - I_{C0}$$

$$V_{CE} = V_{CE0} + v_{ce} \Rightarrow v_{ce} = V_{CE} - V_{CE0}$$

✓ Ce qui donne comme expression de la droite de charge dynamique :

$$I_C = I_{C0} - \frac{V_{CE} - V_{CE0}}{R_L}$$



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

- En mode AC, on trace la droite de charge dynamique

$$I_c = I_{C0} - \frac{V_{CE} - V_{CE0}}{R_L}$$

- ✓ Elle passe par le point (V_{CE0}, I_{C0})
- ✓ On peut ainsi voir l'excursion maximale de V_{CE} qui est centré autour de V_{CE0}

- ❖ Il ne monte pas au-delà de la valeur :

$$V_{CE_{max}} = V_{CE0} + R_L \cdot I_{C0}$$

- ❖ Il ne descend pas en dessous de la valeur de la saturation

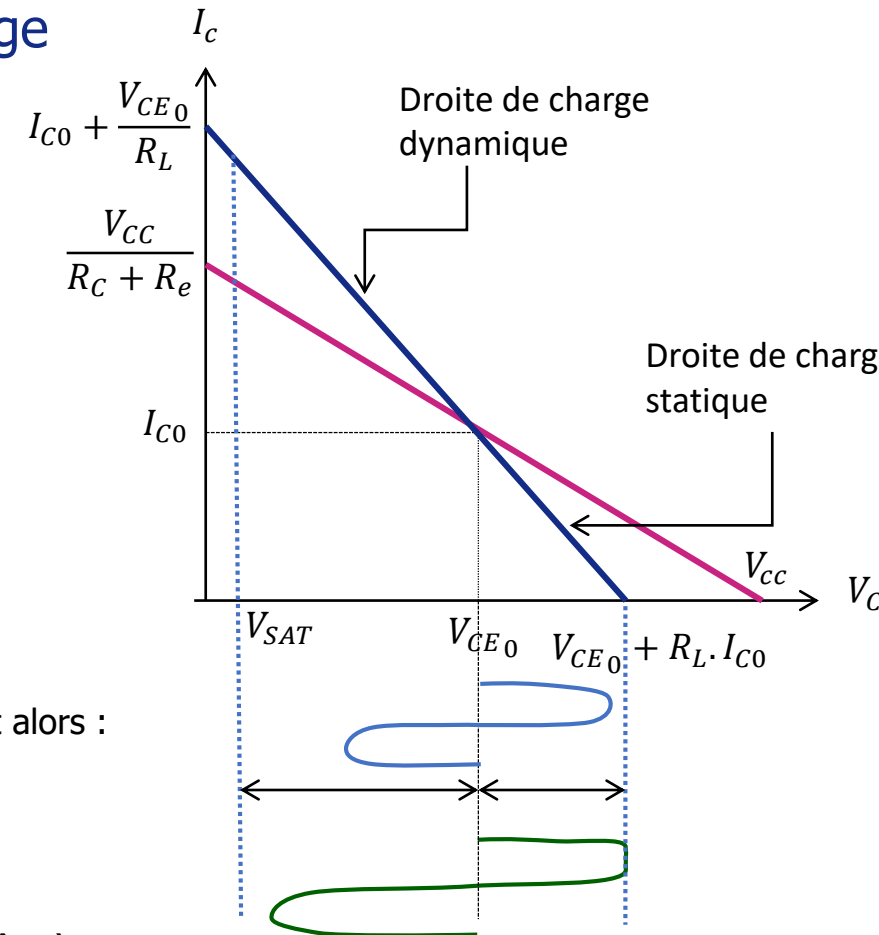
$$V_{CE_{min}} = V_{SAT} = 0,2V$$

- ❖ L'excursion maximale crête à crête que l'on peut avoir pour rester linéaire est alors :

$$V_{CE_{lin}} = 2 * \min(V_{CE_{max}} - V_{CE0}, V_{CE0} - V_{CE_{min}}) V_{pp}$$

- ❖ Si on monte le signal, il sera écrêté vers le haut ou vers le bas

- En sinusoïdal, $v_s = -v_{ce}$ donc c'est également l'amplitude maximale crête à crête du signal de sortie



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

■ Exemple : La droite de charge dynamique

- ✓ On calcule la résistance R_L sachant que $R_C = 3375 \Omega$ et $R_{Load} = 20 k\Omega$

$$R_L = \frac{R_C \cdot R_{Load}}{R_C + R_{Load}} = 2888 \Omega$$

- ✓ La droite de charge dynamique a donc pour expression, avec $V_{CE0} = 6.75V$ et

$$I_{C0} = 2 mA : I_c = 2 \cdot 10^{-3} - \frac{V_{CE} - 6.75}{2888}$$

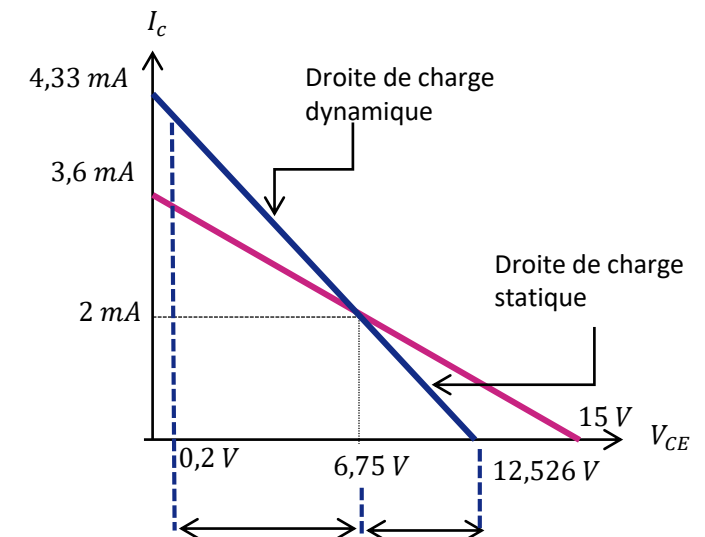
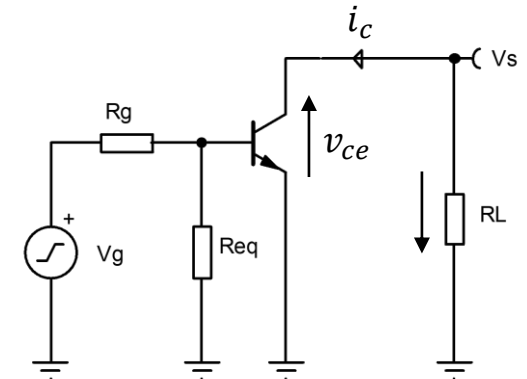
- ✓ La tension maximale est alors :

$$V_{CE_{max}} = V_{CE0} + R_L \cdot I_{C0} = 6.75 + 2888 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 12.526V$$

- ✓ L'excursion linéaire maximale crête à crête en sortie sera donc :

$$V_{CE_{lin}} = 2 * \min(V_{CE_{max}} - V_{CE0}, V_{CE0} - V_{CE_{min}})$$

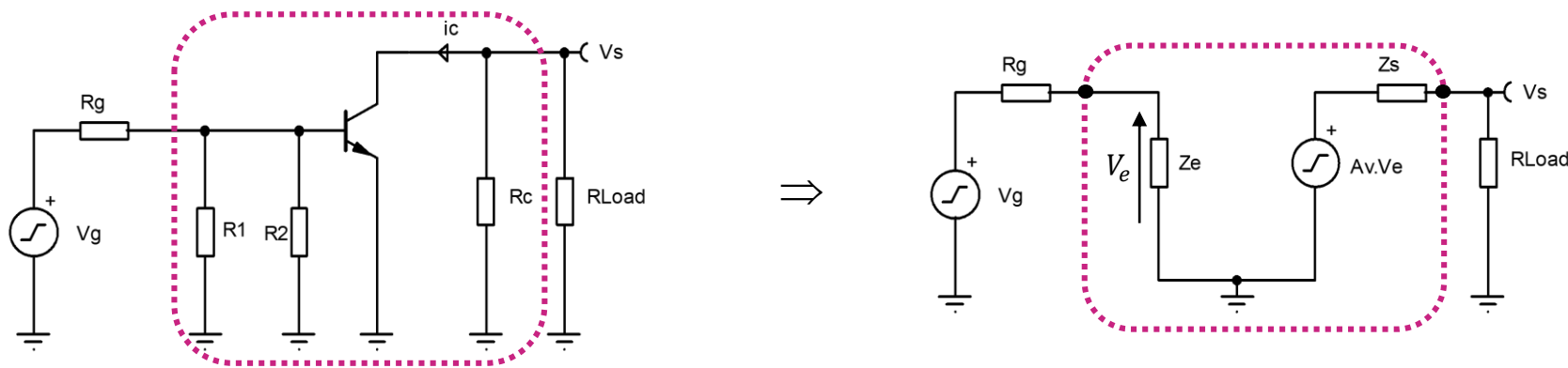
$$= 2 * \min(12.526 - 6.75, 6.75 - 0.2) = 2 * \min(5.776, 6.55) = 11.552 V_{pp}$$



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

- Pour terminer l'analyse AC, il faut maintenant calculer les performances du montage: son gain intrinsèque A_v , son impédance d'entrée Z_e et son impédance de sortie Z_s
- ✓ On va pouvoir remplacer le montage par son modèle équivalent



- ✓ Le gain du montage en tenant compte de la résistance de sortie du générateur R_g et de la résistance de charge R_{Load} sera alors :

$$H(j\omega) = \frac{v_s}{v_g} = \frac{Z_e}{R_g + Z_e} \cdot A_v \cdot \frac{R_{Load}}{R_{Load} + Z_s}$$

- ✓ Si on calcule le gain en prenant la tension d'entrée du montage en sortie du générateur, donc après R_g , l'expression est tout simplement

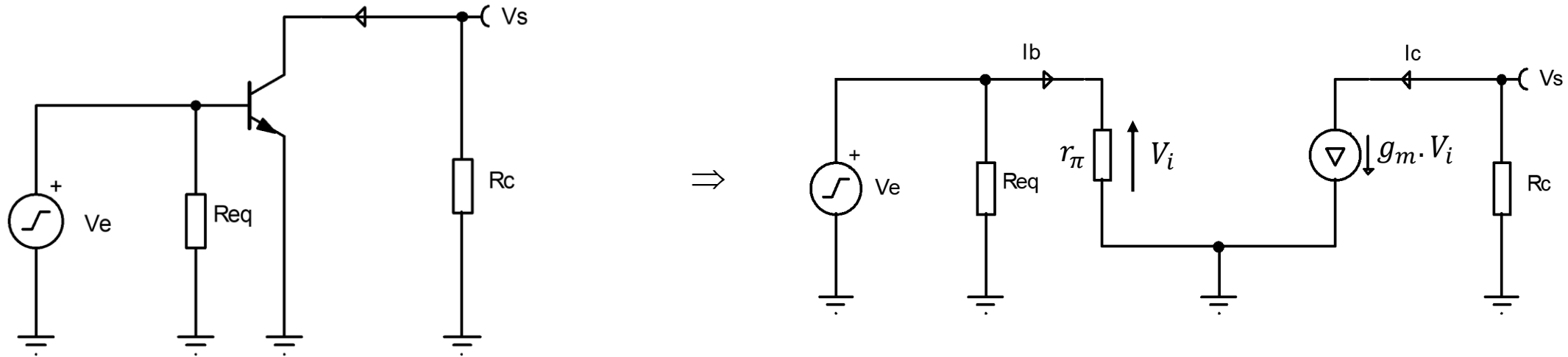
$$H(j\omega) = \frac{v_s}{v_e} = A_v \cdot \frac{R_{Load}}{R_{Load} + Z_s}$$

3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

■ Analyse AC : calcul du gain intrinsèque

✓ On reprend le montage et on remplace le transistor par son schéma équivalent



✓ Pour faire les calculs, il faut connaître les valeurs de r_π et de g_m

$$\diamond g_m = \frac{I_{C0}}{V_T} \text{ et } r_\pi = \frac{V_T}{I_{B0}} = \frac{\beta_0}{g_m} \text{ avec } V_T = \frac{KT}{q} \approx 26 \text{ mV}$$

3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

■ Analyse AC : calcul du gain intrinsèque

✓ On peut écrire sur le montage

- ❖ $v_s = -R_C \cdot i_c$
- ❖ $i_c = g_m \cdot v_i$
- ❖ $v_i = v_e$

✓ On peut en déduire que :

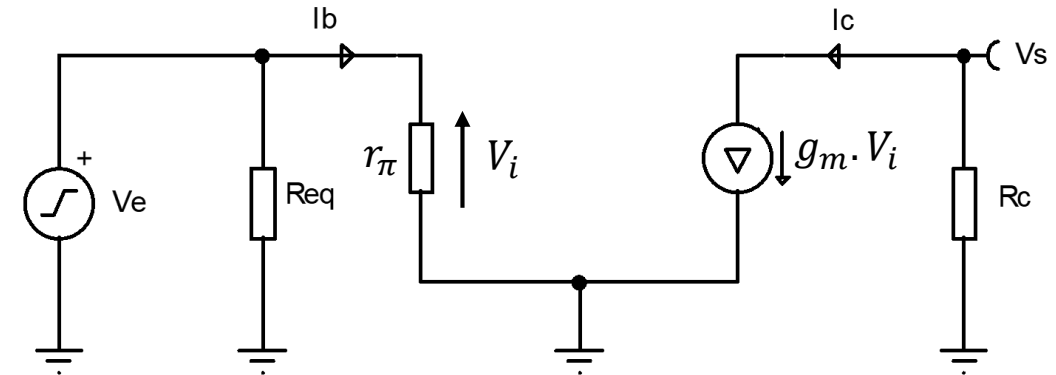
$$v_s = -R_C \cdot g_m \cdot v_e$$

✓ Le gain intrinsèque est donc :

$$A_v = -g_m \cdot R_C$$

✓ Le montage est un montage inverseur, le gain est négatif : $-1 = e^{j\pi}$

✓ On note que le gain est directement proportionnel à g_m . La moindre variation du courant et de la température impliquera une variation du gain du montage



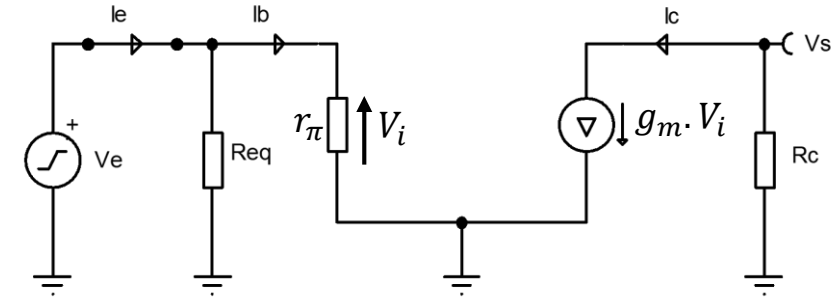
3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

■ Analyse AC : Calcul de l'impédance d'entrée

- ✓ Le calcul de l'impédance d'entrée se fait en calculant le courant que délivre le générateur v_e puisque : $Z_e = \frac{v_e}{i_e}$
- ✓ La loi des nœuds en entrée s'écrit : $i_e = i_{Req} + i_b$
- ✓ On voit que : $v_e = v_i = v_{Req}$, on en déduit alors :

$$i_e = \frac{v_e}{R_{eq}} + \frac{v_e}{r_\pi} \Rightarrow Z_e = \frac{v_e}{i_e} = \frac{1}{\frac{1}{R_{eq}} + \frac{1}{r_\pi}} = \frac{R_{eq} r_\pi}{R_{eq} + r_\pi}$$



- ✓ L'impédance d'entrée du montage est égal à la résistance équivalent de R_{eq} en parallèle avec R_π

$$Z_e = R_{eq} // r_\pi$$

- ❖ Les résistances R_1 et R_2 sont généralement grandes car elles fixent les valeurs du courant I_p qui ne doit pas être trop fort (consommation de courant)
- ❖ La résistance R_π dépend du courant de polarisation du montage : $r_\pi = \frac{I_{B0}}{V_T}$
- ❖ L'impédance d'entrée est généralement très élevée

3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

■ Analyse AC : Calcul de l'impédance de sortie

- ✓ Le calcul de l'impédance d'entrée se fait éteignant le générateur d'entrée et en mettant un générateur e_0 en sortie du montage.

❖ Attention : on garde la source liée

- ✓ On calcule le courant que délivre le générateur puisque :

$$\text{❖ } Z_s = \frac{e_0}{i_0}$$

- ✓ La loi des nœuds en sortie du montage s'écrit :

$$\text{❖ } i_0 = i_c + i_{R_C}$$

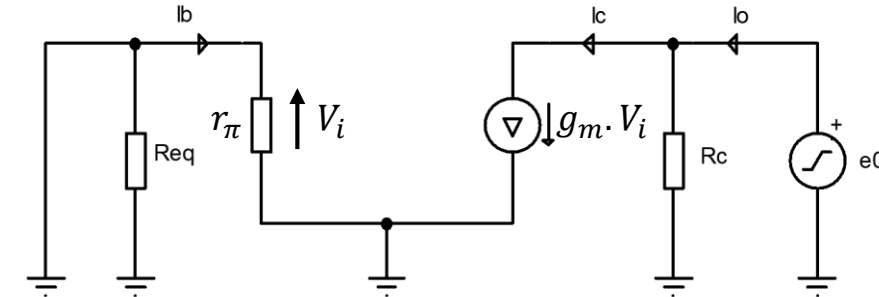
- ✓ On sait que $i_c = g_m \cdot v_i$, mais en entrée il n'y a pas de générateur : $v_i = 0$ V

❖ Donc : $i_c = 0$

- ✓ La tension aux bornes de R_C est e_0 , donc :

$$\text{❖ } i_0 = i_{R_C} = \frac{e_0}{R_C} \Rightarrow Z_s = \frac{e_0}{i_0} = R_C$$

- ✓ La résistance de sortie du montage est tout simplement : $Z_s = R_C$



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

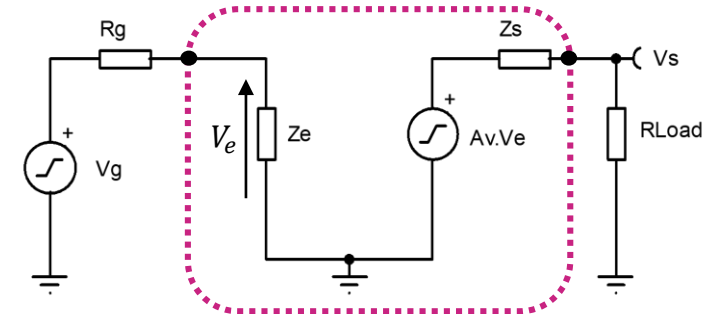
- A partir de l'expression du gain intrinsèque, de l'impédance d'entrée et de sortie du montage, on peut alors calculer l'expression de la fonction de transfert complète :

✓ Avec : $A_v = -g_m \cdot R_c$, $Z_e = \frac{R_{eq} \cdot r_\pi}{R_{eq} + r_\pi}$, $Z_s = R_c$

✓ On obtient : $H(j\omega) = \frac{v_s}{v_g} = \frac{Z_e}{R_g + Z_e} \cdot A_v \cdot \frac{R_{Load}}{R_{Load} + Z_s} = \frac{Z_e}{R_g + Z_e} \cdot (-g_m \cdot R_c) \cdot \frac{R_{Load}}{R_c + R_{Load}}$

✓ On peut simplifier cette expression avec : $R_L = \frac{R_c \cdot R_{Load}}{R_c + R_{Load}}$

$$H(j\omega) = \frac{v_s}{v_g} = \frac{Z_e}{R_g + Z_e} \cdot \left(-g_m \frac{R_c \cdot R_{Load}}{R_c + R_{Load}} \right) = \frac{Z_e}{R_g + Z_e} \cdot (-g_m \cdot R_L)$$



- ✓ R_g est l'impédance de sortie d'un générateur. Si on calcule le gain directement entre v_e et v_s , comme en mesure, on a alors :

$$H(j\omega) = \frac{v_s}{v_e} = -g_m \frac{R_c \cdot R_{Load}}{R_c + R_{Load}} = -g_m \cdot R_L$$

- Si on monte en fréquence, la capacité C_π ne peut pas être négligée, donc on remplace dans les expressions r_π par

Z_π qui est l'impédance équivalent à r_π en parallèle à c_π : $Z_\pi = \frac{r_\pi}{1 + j r_\pi C_\pi \omega}$

- ✓ L'impédance d'entrée à une partie imaginaire

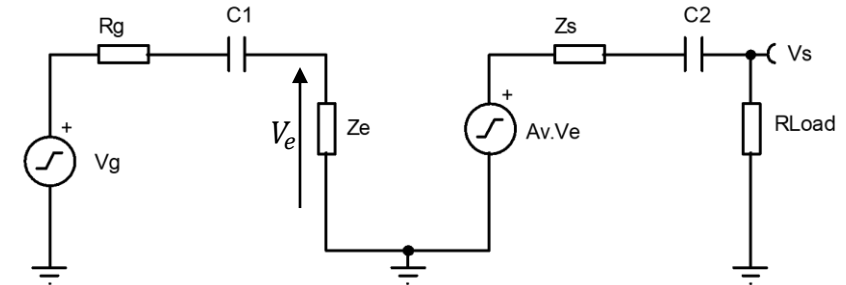
3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1er montage

- Revenons sur les deux condensateurs en entrée C_1 et en sortie C_2
 - ✓ On a émis l'hypothèse pour l'analyse AC que leur impédance est très faible
 - ✓ Si on les prend en compte dans le calcul du montage complet et on considère purement résistive $Z_e = R_e$ et $Z_s = R_s$:

❖ En entrée : $v_e = \frac{R_e}{R_e + R_g + Z_{C1}} \cdot v_g = \frac{jR_e C_1 \omega}{1 + j(R_g + R_e)\omega} v_g$

❖ En sortie : $v_s = \frac{R_{Load}}{R_{Load} + R_s + Z_{C2}} \cdot A_v \cdot v_e = \frac{jR_{Load} \cdot C_2 \omega}{1 + j(R_{Load} + R_s)\omega} \cdot A_v \cdot v_e$



- ✓ Les deux condensateurs introduisent des filtres passe-haut
 - ❖ Cela coupe bien la tension continue
 - ❖ Mais il faut que la fréquence de coupure des deux filtres soit inférieure à la fréquence de fonctionnement du montage

3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

■ Exemple : Calcul du gain intrinsèque du montage

- ❖ $I_{C0} = 2mA, V_{BE0} = 0.6V, V_{CE0} = 6.75V, \beta = 150, I_p = 0.1mA, V_{Re} = 1.5V, V_{CC} = 15V, R_{Load} = 20k\Omega$
- ❖ Pour rappel : $R_1 = 12.9k\Omega, R_2 = 2100\Omega, R_c = 3375\Omega$

✓ On calcule R_{eq}

$$\text{❖ } R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 1806 \Omega$$

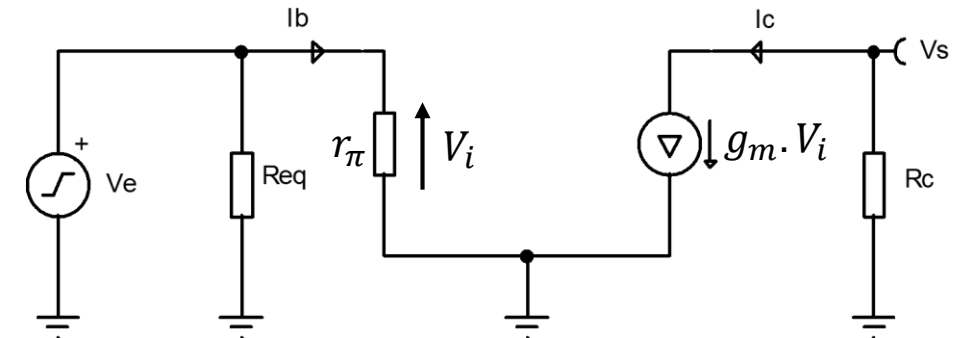
✓ On calcule r_π et g_m

$$\text{❖ } g_m = \frac{I_{C0}}{V_T} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{26 \cdot 10^{-3}} = 76,9 \text{ mS}$$

$$\text{❖ } r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \beta \frac{V_T}{I_{C0}} = 150 \frac{26 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} = 1950 \Omega$$

✓ Le gain intrinsèque est donc :

$$A_v = -g_m \cdot R_c = -76,9 \cdot 10^{-3} * 3375 = -259,6$$



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

■ Exemple : Calcul des résistances d'entrée et de sortie, et de $H(j\omega)$

❖ $I_{C0} = 2mA, V_{BE0} = 0.6V, V_{CE0} = 6.75V, \beta = 150, I_p = 0.1mA, V_{Re} = 1.5V, V_{cc} = 15V, R_{Load} = 20 k\Omega, R_g = 50 \Omega$

✓ L'impédance d'entrée est tout simplement : $Z_e = R_{eq} // R_\pi$

❖ $Z_e = \frac{R_{eq} \cdot r_\pi}{R_{eq} + r_\pi} = \frac{1806 \cdot 1950}{1806 + 1950} = 938 \Omega$

✓ L'impédance de sortie est tout simplement : $Z_s = R_c = 3375 \Omega$

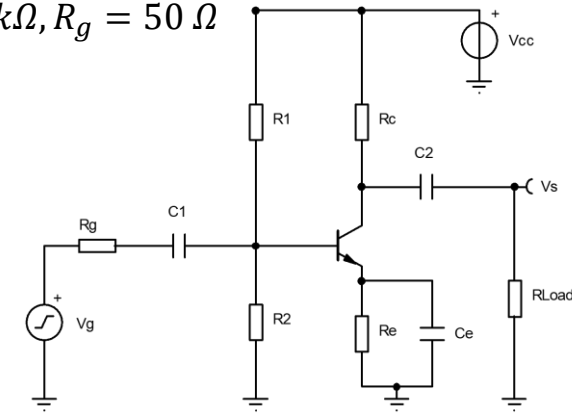
✓ Le gain du montage complet est donc :

$$H(j\omega) = \frac{v_s}{v_g} = \frac{Z_e}{R_g + Z_e} \cdot A_v \cdot \frac{R_{Load}}{R_{Load} + Z_s} = \frac{938}{938 + 50} \cdot (-259,6) \cdot \frac{20 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3 + 3375} = -210.7 \approx -211$$

❖ En décibel : $20 \cdot \log_{10} |H(j\omega)| = 46,5dB$

✓ Si on calcule $H(j\omega)$ en prenant la tension à l'entrée du montage, après le résistance R_g , on a alors $H(j\omega) = -g_m \cdot R_L$

❖ $R_L = \frac{R_{Load} \cdot R_c}{R_{Load} + R_c} = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 3375}{20 \cdot 10^3 + 3375} = 2888 \Omega$, ce qui donne alors : $H(j\omega) = \frac{v_s}{v_g} = -g_m \cdot R_L = -76,9 \cdot 10^{-3} \cdot 2888 = -222$ soit 46,9 dB

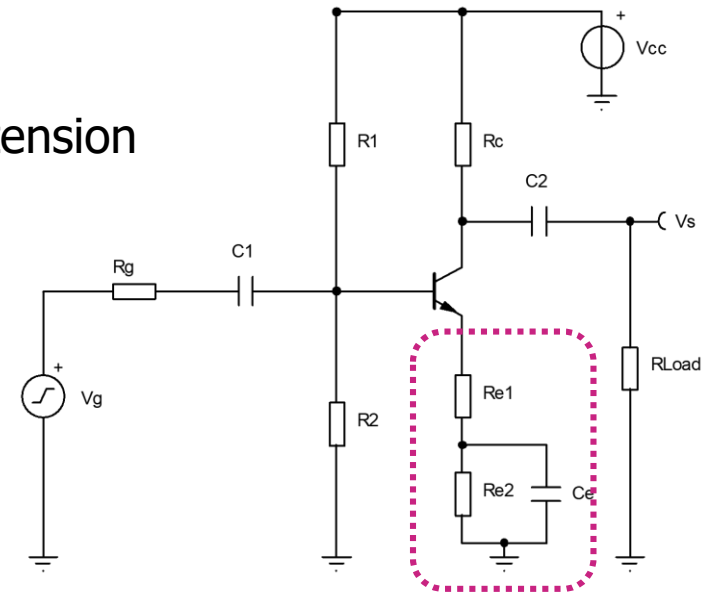


3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 2nd montage

- Sur cette version du montage, la résistance R_e est séparée en deux valeurs

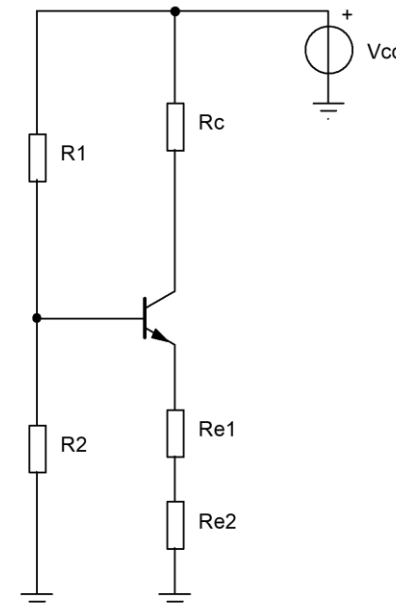
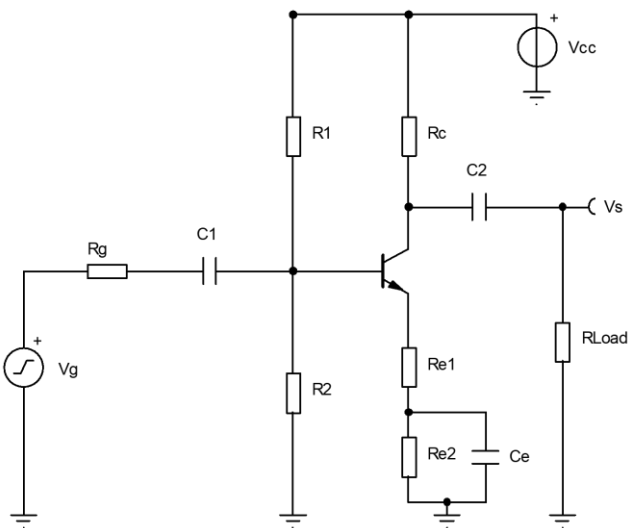
- ❖ Seule R_{e2} est « découplée » par un condensateur
- ❖ Cette variante va permettre de stabiliser le gain en tension



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 2nd montage

- L'analyse DC de ce montage est identique à celle du précédent montage
 - ✓ On a juste maintenant : $R_e = R_{e1} + R_{e2}$
 - ✓ On garde au niveau de la résistance R_{e2} une tension de l'ordre de 10% de V_{cc} pour la stabilisation en température
 - ✓ Généralement on a une relation : $R_{e2} = k \cdot R_{e1}$ et R_{e1} est de faible valeur
 - ❖ Le gain va devenir proportionnel à un rapport de résistance, et inversement proportionnel à R_{e1}
- La droite de charge est inchangée avec $R_e = R_{e1} + R_{e2}$



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 2nd montage

- Les valeurs de V_{CC} , V_{BE0} , V_{Re2} , I_{C0} , I_p et β sont données

✓ Le rapport entre R_{e1} et R_{e2} est donné

- Il faut en déduire les valeurs des résistances

✓ Il faut juste faire des lois des mailles

$$\diamond V_{CC} = V_{R_1} + V_{R_2} = R_c \cdot I_{C0} + V_{CE0} + (R_{e1} + R_{e2}) \cdot I_{E0}$$

$$\diamond V_{CC} = R_1 \cdot I_p + R_2 (I_p - I_{B0})$$

$$\diamond V_{Re2} = R_{e2} \cdot I_{E0}$$

$$\diamond R_{e1} = k \cdot R_{e2}$$

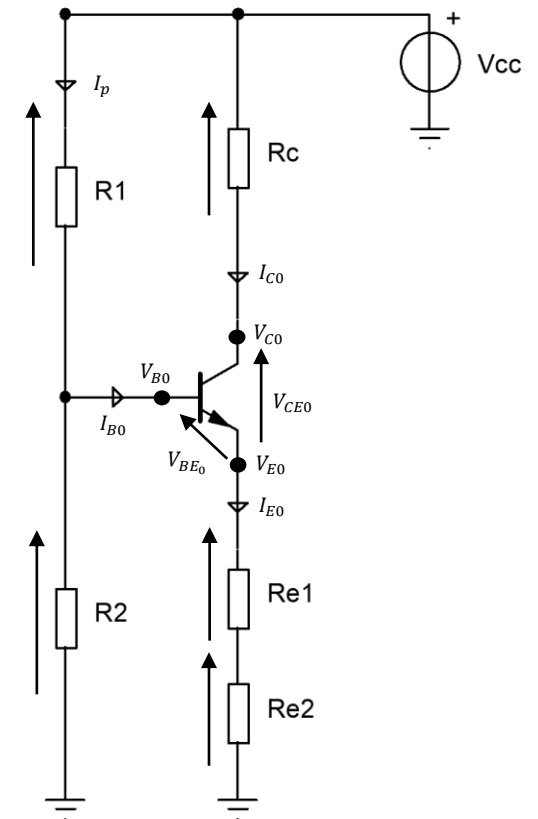
$$\diamond V_{R2} = R_2 (I_p - I_{B0}) = V_{BE0} + V_{Re1} + V_{Re2}$$

✓ On fait des hypothèses simplificatrices suivantes :

✦ Avec $\beta \geq 100$, $I_{E0} \approx I_{C0}$

✦ Pour que le système soit stable en température : $I_p \gg I_{B0}$

✓ On en déduit simplement les valeurs des composants



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 2nd montage

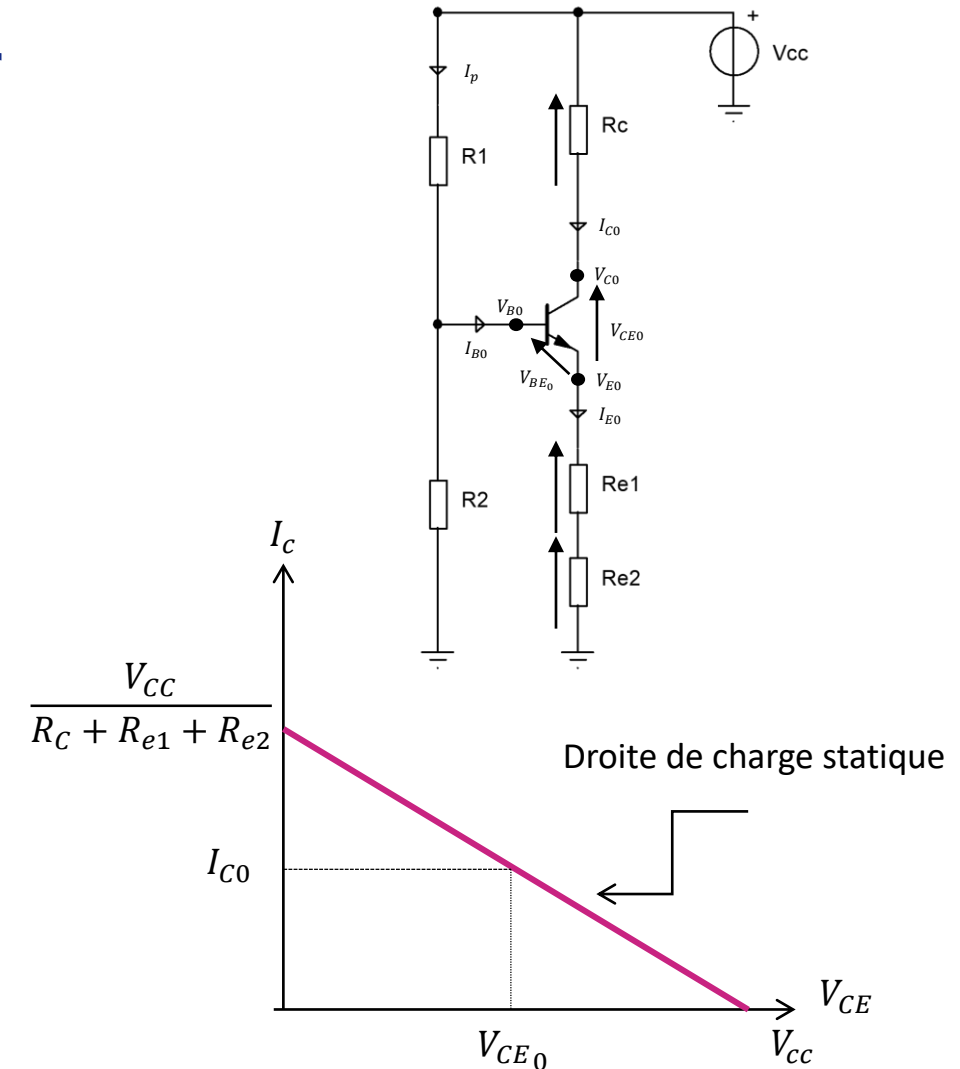
✓ On trace ensuite la droite de charge statique

❖ La loi des mailles en sortie du montage donne

$$V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE} + (R_{e1} + R_{e2}) \cdot I_C \Rightarrow I_C = \frac{(V_{CC} - V_{CE})}{R_C + R_{e1} + R_{e2}}$$

✓ Elle permet de voir l'évolution du point de polarisation en cas de variation

❖ Si V_{CE0} augmente, I_{C0} diminue

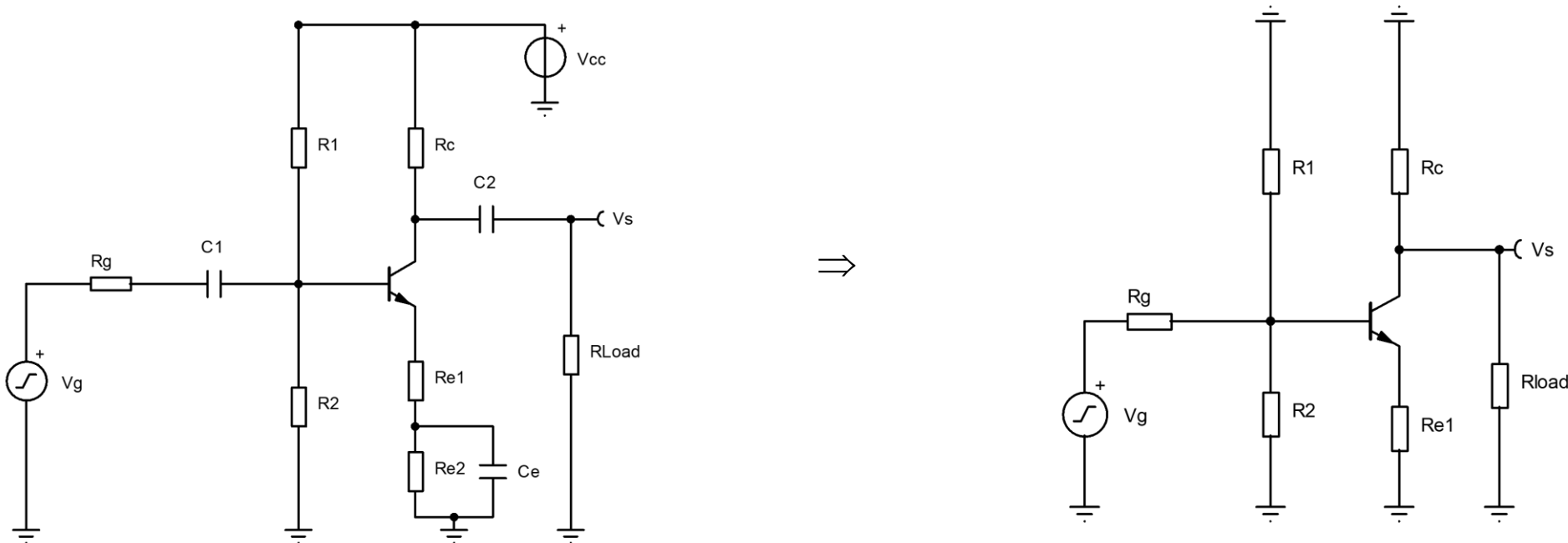


3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 2nd montage

✓ On étudie ensuite le circuit du point de vue sinusoïdal petit signal : analyse AC

- ❖ On éteint les sources continues : les sources de tension deviennent des fils
- ❖ Les condensateurs sont des courts circuits
- ❖ Sur ce montage, R_{e1} va rester



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 2nd montage

- En mode AC, on trace la droite de charge dynamique

- ✓ La droite de charge dynamique est le tracé de la droite : $i_c = f(v_{ce})$
- ✓ On se rappelle que le courant i_c et la tension v_{ce} sont les composantes alternatives du courant de collecteur et de la tension collecteur-émetteur

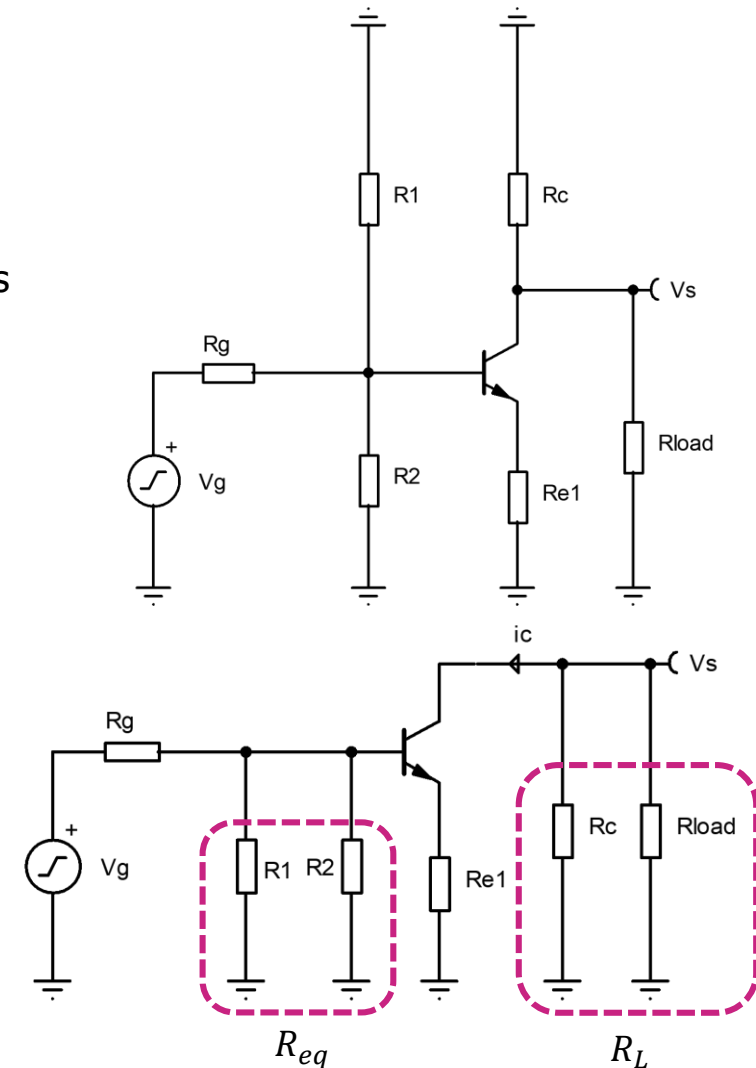
$$I_C = I_{C0} + i_c$$

$$V_{CE} = V_{CE0} + v_{ce}$$

- ✓ La droite de charge dynamique donne l'excursion maximale possible que l'on peut avoir pour la tension V_{ce} du transistor, et donc en déduire l'excursion maximale possible pour le signal de sortie
- ✓ Pour faire le calcul, on redessine le montage, comme pour le montage précédent

❖ R_{eq} la résistance équivalente à R_1 en parallèle à R_2 : $R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

❖ R_L La résistance équivalent à R_c en parallèle à R_{Load} : $R_L = \frac{R_c \cdot R_{Load}}{R_c + R_{Load}}$



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 2nd montage

- En mode AC, on trace la droite de charge dynamique

- ✓ La loi des mailles en sortie du transistor est :

$$v_{Re1} + v_{ce} + v_{RL} = 0$$

$$v_{ce} = -R_L \cdot i_c - R_{e1} \cdot i_c \Rightarrow i_c = -\frac{v_{ce}}{R_L + R_{e1}}$$

- ✓ On note ici que l'équation de la droite de charge est un peu différente de celle du montage précédent

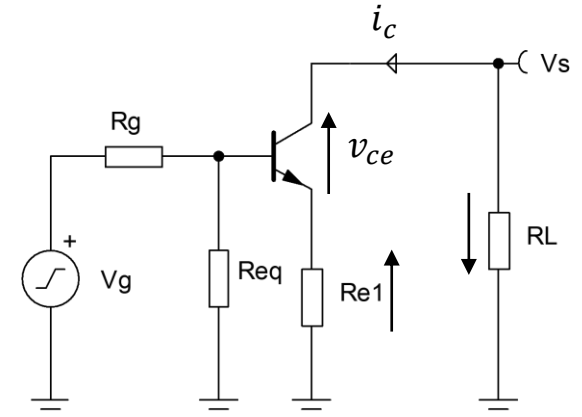
- ❖ Mais $R_L \gg R_{e1}$, donc l'excursion maximale en sortie sera très similaire
- ❖ Pour le tracé, le plus facile est de réutiliser le fait que :

$$I_C = I_{C0} + i_c \Rightarrow i_c = I_C - I_{C0}$$

$$V_{CE} = V_{CE0} + v_{ce} \Rightarrow v_{ce} = V_{CE} - V_{CE0}$$

- ✓ Ce qui donne comme expression de la droite de charge dynamique :

$$I_c = I_{C0} - \frac{V_{CE} - V_{CE0}}{R_L + R_{e1}}$$



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 2nd montage

- On trace donc la droite de charge dynamique

$$I_c = I_{C0} - \frac{V_{CE} - V_{CE0}}{R_L + R_{e1}}$$

- ✓ Elle passe par le point (V_{CE0}, I_{C0})
- ✓ On peut ainsi voir l'excursion maximale de V_{CE} qui est centré autour de V_{CE0}

- ❖ Il ne monte pas au-delà de la valeur :

$$V_{CE_{max}} = V_{CE0} + (R_L + R_{e1}) \cdot I_{C0}$$

- ❖ Il ne descend pas en dessous de la valeur de la saturation

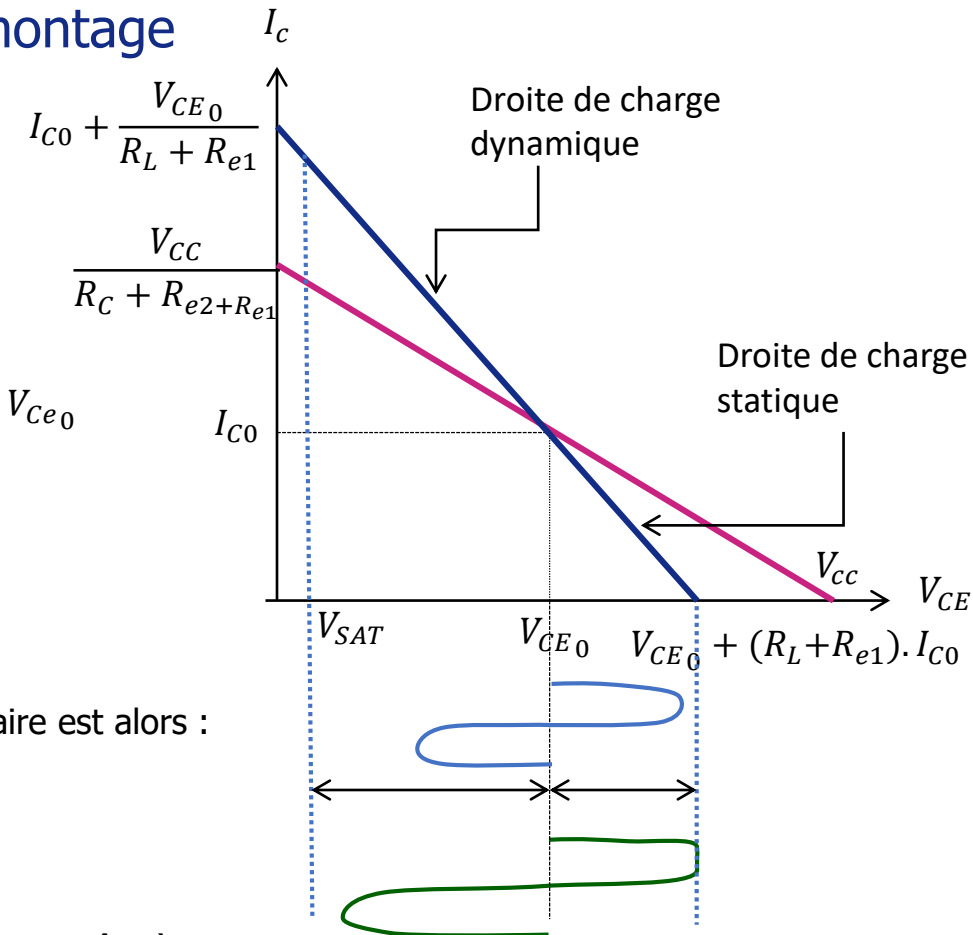
$$V_{CE_{min}} = V_{SAT} = 0,2V$$

- ❖ L'excursion maximale crête à crête que l'on peut avoir pour rester linéaire est alors :

$$V_{CE_{lin}} = 2 * \min(V_{CE_{max}} - V_{CE0}, V_{CE0} - V_{CE_{min}}) V_{pp}$$

- ❖ Si on monte le signal, il sera écrêté vers le haut ou vers le bas

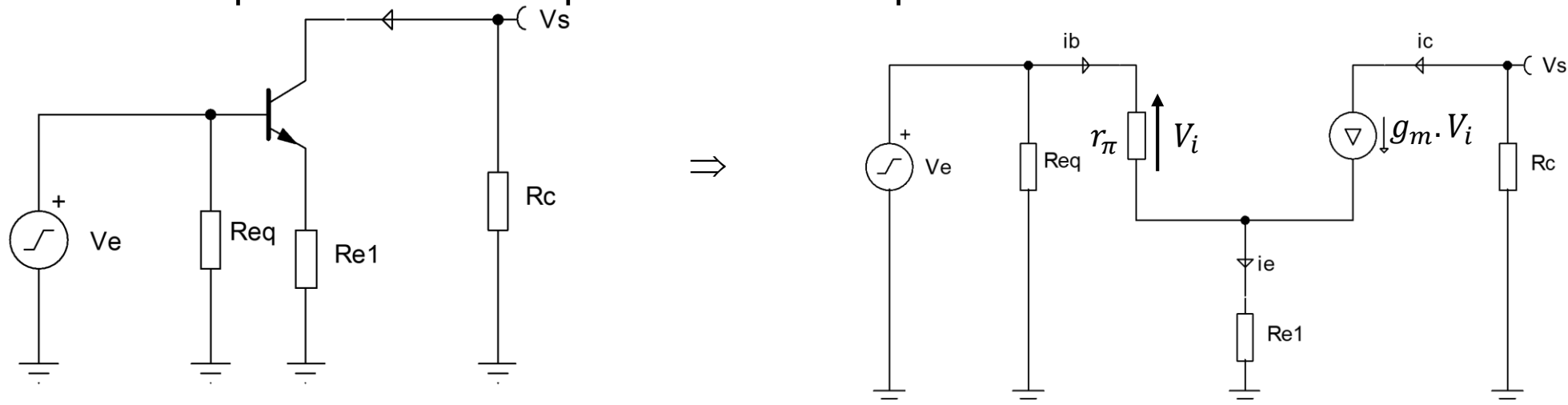
- En sinusoïdal, $v_s = -v_{ce}$ donc c'est également l'amplitude maximale crête à crête du signal de sortie



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 2nd montage

- Analyse AC : on calcule le gain intrinsèque du montage
 - ✓ On reprend le montage sans le générateur et son impédance de sortie, et sans R_{Load}
 - ✓ On remplace le transistor par son schéma équivalent



- ✓ Pour faire les calculs, il faut connaître les valeurs de r_π et de g_m

$$\diamond g_m = \frac{I_{C0}}{V_T} \text{ et } r_\pi = \frac{V_T}{I_{B0}} = \frac{\beta}{g_m} \text{ avec } V_T = \frac{KT}{q} \approx 26 \text{ mV}$$

3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 2nd montage

■ Analyse AC : calcul du gain intrinsèque

✓ Au niveau des courants :

$$\diamond i_e = i_c + i_b \quad i_b = \frac{v_i}{r_\pi} \quad i_c = g_m \cdot v_i$$

✓ Les tensions aux bornes des résistances

$$\diamond v_{R_{e1}} = R_{e1} \cdot i_e = R_{e1}(i_b + i_c) = R_{e1} \left(\frac{v_i}{r_\pi} + g_m v_i \right) = R_{e1} \left(\frac{1}{r_\pi} + g_m \right) v_i$$

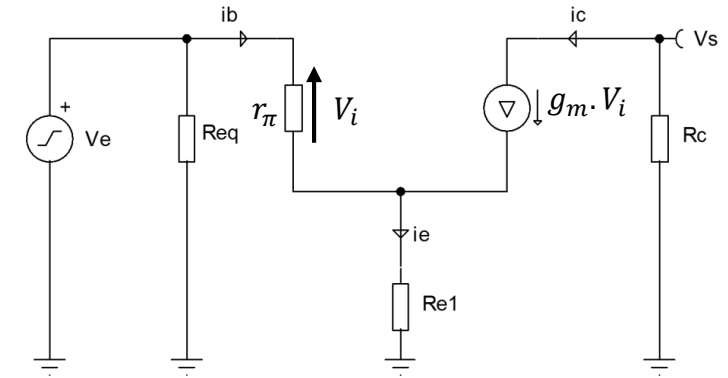
$$\diamond v_s = -R_C \cdot i_c = -R_C g_m v_i \Rightarrow v_i = -\frac{1}{R_C g_m} v_s$$

✓ La maille en entrée

$$\diamond v_e = v_i + v_{R_{e1}} = v_i + R_{e1} \left(\frac{1}{r_\pi} + g_m \right) v_i = \left[1 + R_{e1} \left(\frac{1}{r_\pi} + g_m \right) \right] v_i$$

✓ On obtient donc :

$$\diamond v_e = \left[1 + R_{e1} \left(\frac{1}{r_\pi} + g_m \right) \right] \cdot \left(-\frac{1}{R_C g_m} \right) v_s$$



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 2nd montage

- Analyse AC : calcul du gain intrinsèque : $v_e = \left[1 + R_{e1} \left(\frac{1}{r_\pi} + g_m\right)\right] \cdot \left(-\frac{1}{R_c g_m}\right) v_s$
- Le gain intrinsèque du montage est alors :

$$H(j\omega) = \frac{v_s}{v_e} = - \frac{g_m R_c}{1 + R_{e1} \left(\frac{1}{r_\pi} + g_m\right)}$$

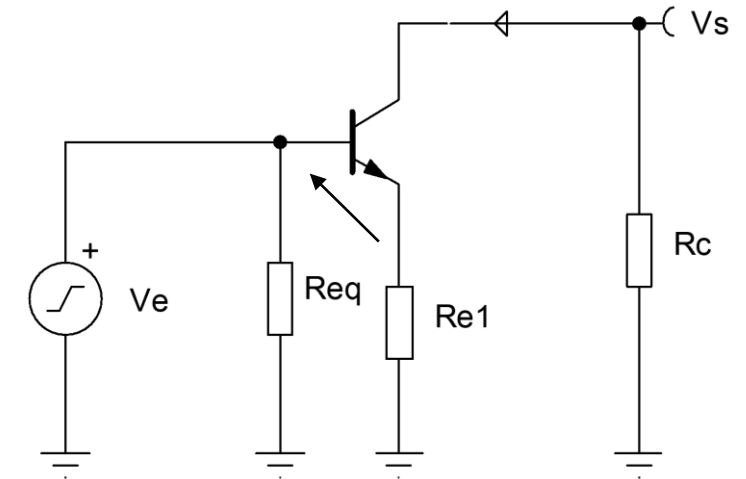
- On peut simplifier l'expression en se rappelant que : $r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \Rightarrow r_\pi \cdot g_m = \beta$

$$H(j\omega) = \frac{v_s}{v_e} = - \frac{g_m R_c r_\pi}{r_\pi + R_{e1} (1 + r_\pi g_m)} = - \frac{\beta R_c}{r_\pi + (1 + \beta) R_{e1}}$$

- Avec β très grand, si $r_\pi \ll (1 + \beta) R_{e1}$, on a alors de gain proportionnel au rapport de R_c sur R_{e1}

$$H(j\omega) \approx - \frac{R_c}{R_{e1}}$$

- Le gain du montage est beaucoup plus stable que pour le montage précédent
 - ✓ Mais il ne faut pas que la résistance R_{e1} soit de trop forte valeur pour ne pas trop diminuer le gain
- Si on regarde le montage, on voit qu'en fait la résistance R_{e1} fait une contre réaction sur l'entrée du transistor : $V_{be} = v_e - v_{R_{e1}}$
 - ❖ Le gain diminue, mais la bande passante va augmenter.....



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 2nd montage

■ Analyse AC : Calcul de l'impédance d'entrée

✓ Le calcul de l'impédance d'entrée se fait en calculant le courant que délivre le générateur v_e : $Z_e = \frac{v_e}{i_e}$

❖ La loi des nœuds en entrée s'écrit : $i_{in} = i_{Req} + i_b$

❖ On voit que : $v_e = v_{Req}$ et que $v_e = v_i + v_{Re1}$

❖ On a toujours : $i_e = i_c + i_b$ $i_b = \frac{v_i}{r_\pi}$ $i_c = g_m \cdot v_i = g_m r_\pi i_b$

✓ Donc : $v_e = v_i + v_{Re1} = r_\pi \cdot i_b + R_{e1}(i_b + g_m \cdot r_\pi \cdot i_b) = [r_\pi + R_{e1}(1 + g_m r_\pi)]i_b$

✓ On peut en déduire que :

$$\circ i_{in} = i_b + i_{Req} = \frac{v_e}{[r_\pi + R_{e1}(1 + g_m r_\pi)]} + \frac{v_e}{R_{eq}} \Rightarrow Z_e = \frac{v_e}{i_e} = \frac{1}{\frac{1}{R_{eq}} + \frac{1}{[r_\pi + R_{e1}(1 + g_m r_\pi)]}}$$

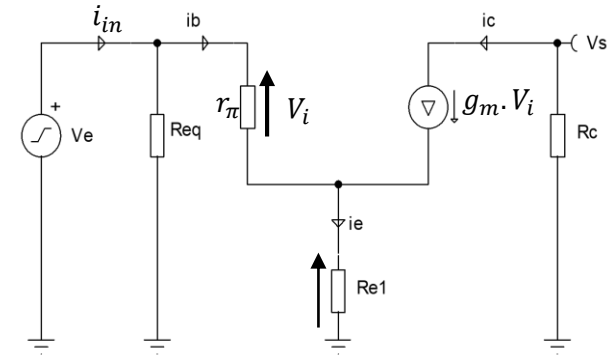
✓ L'impédance d'entrée est donc l'impédance équivalente de deux impédances en parallèle :

$$Z_e = R_{eq} // [r_\pi + R_{e1}(1 + g_m r_\pi)]$$

❖ Sachant que $g_m \cdot r_\pi = \beta$

$$Z_e = R_{eq} // [r_\pi + R_{e1}(1 + \beta)]$$

❖ Elle est de forte valeur, plus forte que le montage précédent



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 1^{er} montage

■ Analyse AC : Calcul de l'impédance de sortie

- ✓ Le calcul de l'impédance d'entrée se fait éteignant le générateur d'entrée et en mettant un générateur e_0 en sortie du montage.

- ❖ Attention : on garde la source liée

- ✓ Mais elle ne « démarre pas »

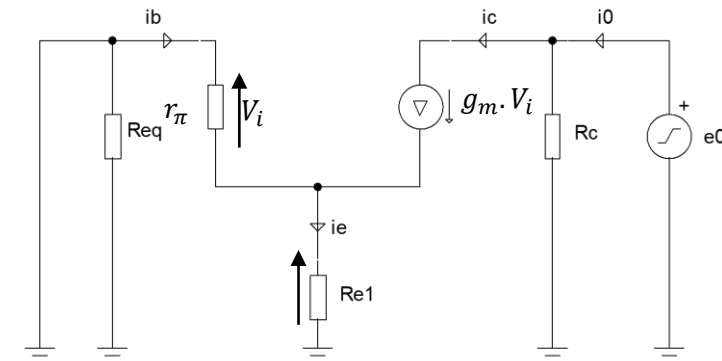
- ❖ Avant que l'on branche e_0 , il n'y a pas de courant

- La source liée est éteinte : circuit ouvert

- ❖ Quand on branche e_0 , la source liée étant un circuit ouvert, il n'y a pas de création de courant, elle reste éteinte

- ✓ La résistance de sortie est donc tout simplement : $Z_s = R_c$

- ❖ C'est la même valeur que pour le montage précédent



3. L'amplificateur à transistor bipolaire

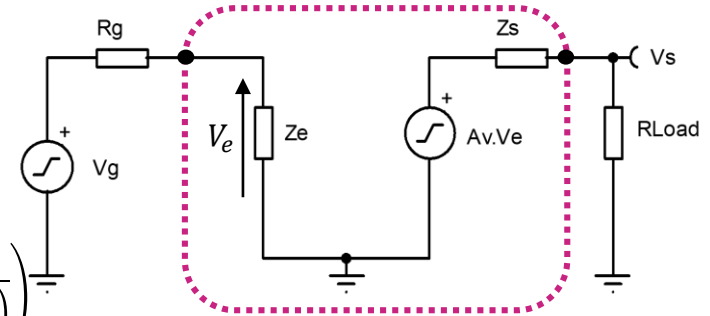
► Fonctionnement et analyse de l'émetteur commun : 2nd montage

- A partir de l'expression du gain intrinsèque, de l'impédance d'entrée et de sortie du montage, on peut alors calculer l'expression de la fonction de transfert complète :

✓ On obtient : $H(j\omega) = \frac{v_s}{v_g} = \frac{Z_e}{R_g + Z_e} \cdot A_v \cdot \frac{R_{Load}}{R_{Load} + Z_s} = \frac{Z_e}{R_g + Z_e} \cdot \left(-\frac{g_m R_c}{1 + R_{e1} \left(\frac{1}{r_\pi} + g_m \right)} \right) \cdot \frac{R_{Load}}{R_c + R_{Load}}$

✓ On peut simplifier cette expression avec : $R_L = \frac{R_c \cdot R_{Load}}{R_c + R_{Load}}$

$$H(j\omega) = \frac{v_s}{v_g} = \frac{Z_e}{R_g + Z_e} \cdot \left(-\frac{g_m}{1 + R_{e1} \left(\frac{1}{r_\pi} + g_m \right)} \frac{R_c \cdot R_{Load}}{R_c + R_{Load}} \right) = \frac{Z_e}{R_g + Z_e} \cdot \left(-\frac{g_m R_L}{1 + R_{e1} \left(\frac{1}{r_\pi} + g_m \right)} \right)$$



- ✓ R_g est l'impédance de sortie d'un générateur. Si on calcule le gain directement entre v_e et v_s , comme en mesure, on a alors :

$$H(j\omega) = \frac{v_s}{v_e} = -\frac{g_m R_L}{1 + R_{e1} \left(\frac{1}{r_\pi} + g_m \right)}$$

- ✓ Si on monte en fréquence, la capacité C_π ne peut pas être négligée, donc on remplace dans les expressions r_π par Z_π qui est l'impédance équivalent à r_π en parallèle à c_π : $Z_\pi = \frac{r_\pi}{1 + j r_\pi C_\pi \omega}$
- ✓ Les condensateurs C_1 et C_2 ont la même influence sur ce montage que pour le montage précédent

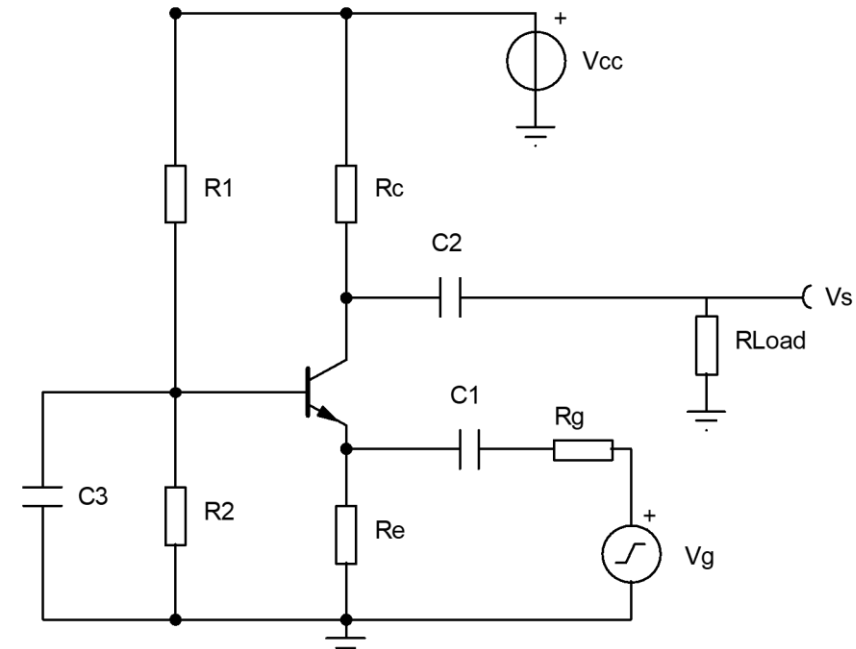
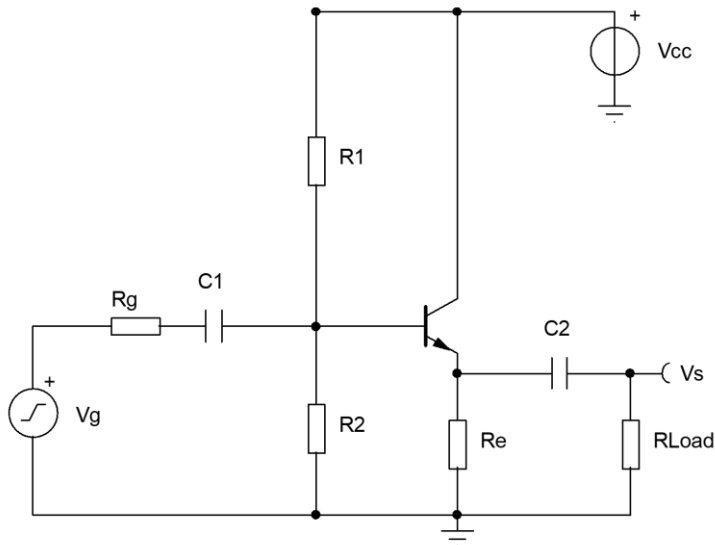
3. L'amplificateur à transistor bipolaire

► Autres montages à transistor bipolaire

■ Il existe deux autres montages à transistor bipolaire

- ❖ Le collecteur commun : l'entrée est sur la base, la sortie du l'émetteur
 - C'est un suiveur : gain en tension de 1, gain en courant
- ❖ Le base commune : l'entrée est sur l'émetteur, la sortie sur le collecteur
 - C'est un montage non inverseur, de fort gain en tension admettant une forte dynamique du signal de sortie

✓ L'analyse se fait de la même manière



4. Le transistor bipolaire en commutation

► Le transistor bipolaire peut fonctionner en commutation

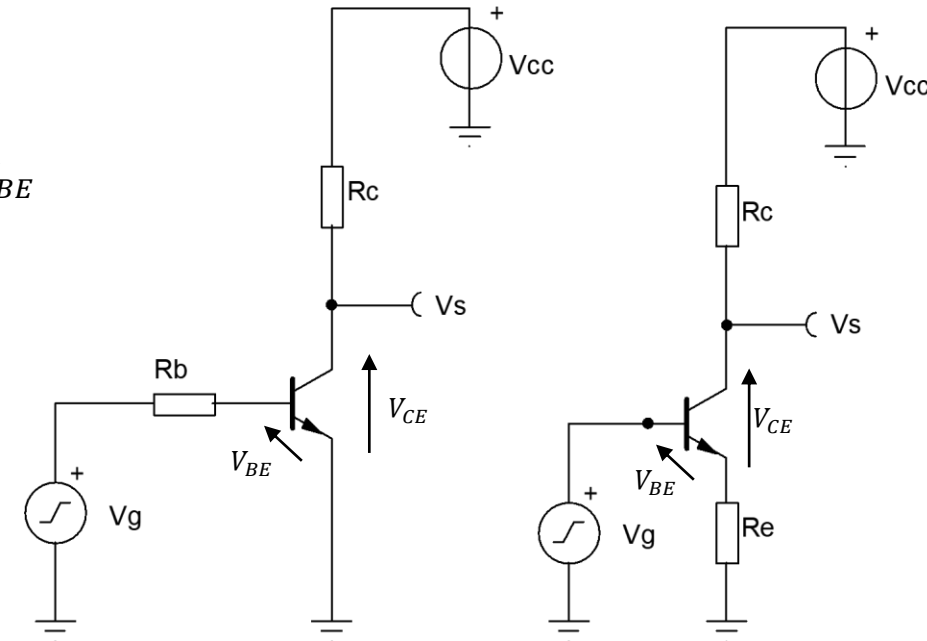
- Pour le bloquer, il suffit de mettre tension V_{BE} à zéro
 - ✓ En fait bien en dessous de la tension de seuil de la diode E-B
- Pour le rendre passante, il faut lui appliquer une tension positive sur V_{BE}
 - ✓ $V_{BE} \approx 0.7 V$ car sinon la diode E-B part en claquage (destructif...)
- Le générateur est un signal carré
- Le montage est réalisé soit :
 - ✓ avec une résistance entre le générateur et la base :

$$\begin{aligned} V_g &= R_b \cdot I_B + V_{BE} \\ V_{cc} &= R_c \cdot I_C + V_{CE} \\ I_C &= \beta \cdot I_B \end{aligned}$$

- ✓ avec une résistance entre l'émetteur et la masse :

$$\begin{aligned} V_g &= V_{BE} + R_E \cdot I_C \\ V_{cc} &= R_c \cdot I_C + V_{CE} + R_E \cdot I_C \\ I_C &= \beta \cdot I_B \end{aligned}$$

- Le montage est calculé en fonction du courant I_C voulu (par exemple pour allumer une LED)
- De la tension V_{CE} quand le transistor est « on » : plus il est proche de V_{SAT} , moins il dissipe de puissance
- De la valeur du gain en courant DC, β_F , qui chute lorsque l'on se rapproche de la saturation.



Le cours est terminé