



Cours 5 : Le transistor bipolaire (BJT) en régime dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Le transistor bipolaire en régime dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

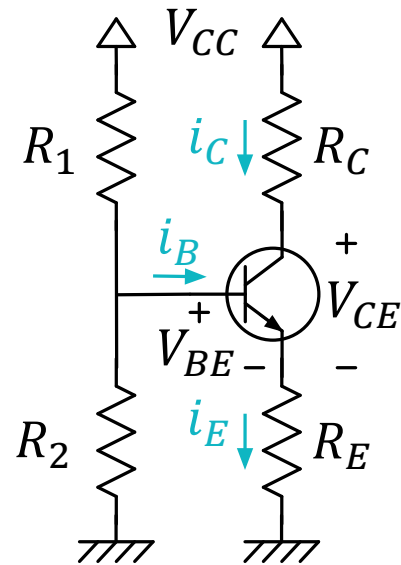
3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Montage DC

On appelle montage DC lorsqu'aucune source alternative n'apparaît dans le montage.

Transistor 2N3904, avec $V_{CC} = 10V$, $V_{BE} = 0,7V$, $\beta = 200$
 $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 2,2k\Omega$, $R_C = 3,6k\Omega$ et $R_E = 1k\Omega$



Rappel : Nous avons trouvé dans le chapitre précédent les résultats suivants :

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 1,8V$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 1,1V$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = 1,1mA$$

$$I_C \approx I_E = 1,1mA \text{ avec } \beta + 1 \approx \beta$$

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C = 6,0V$$

Cet état de polarisation, établi en DC, définit le point de fonctionnement Q que l'on appellera à partir de maintenant **point de repos**, traduisant le fait que le signal de la source alternative est nul.

BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

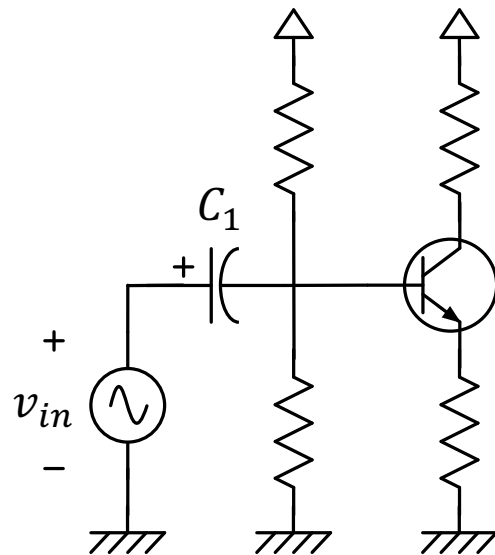
- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Montage AC

Ajoutons au montage précédent un signal variable v_{in} , qui est une source alternative ici.



- Ce signal v_{in} est appliqué à la base du transistor NPN.
- Le problème est que si v_{in} possède une composante continue, celle-ci va forcément modifier le point de repos Q . Pour supprimer la composante continue, on rajoute en série un condensateur de liaison convenablement choisi.
- Rappel : un condensateur en DC est équivalent à un interrupteur ouvert, et en AC à un interrupteur fermé.

Placé en série, C_1 ne laisse passer que la composante alternative du signal sans changer la position du point de repos Q .

BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

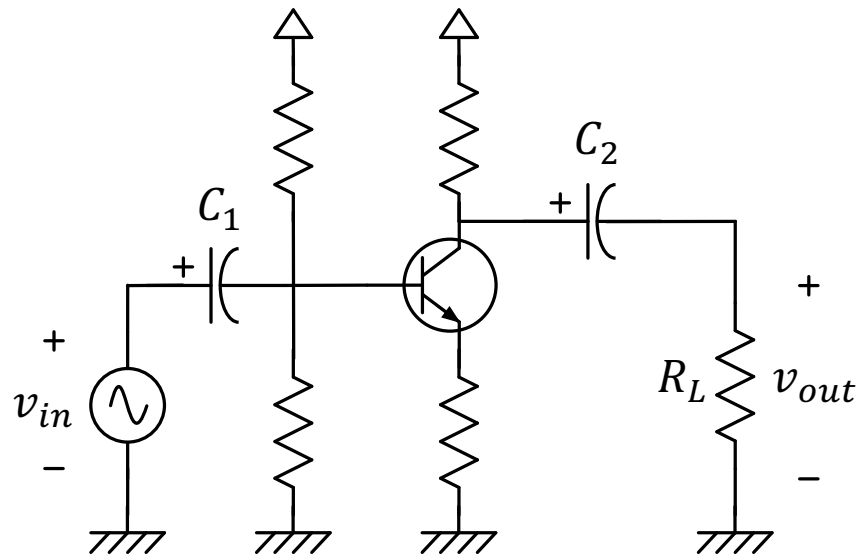
2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Montage AC



- De même, en plaçant une résistance de charge R_L en sortie de l'ampli, au niveau du collecteur, cette résistance va forcément changer le potentiel V_C .
- Solution : En plaçant un condensateur C_2 entre le collecteur et la charge, la tension DC sera la même au collecteur avec ou sans la présence du générateur AC.

En conclusion mettre les deux condensateurs C_1 et C_2 permet d'empêcher la source v_{in} et la charge R_L de modifier les coordonnées du point de repos Q .

BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

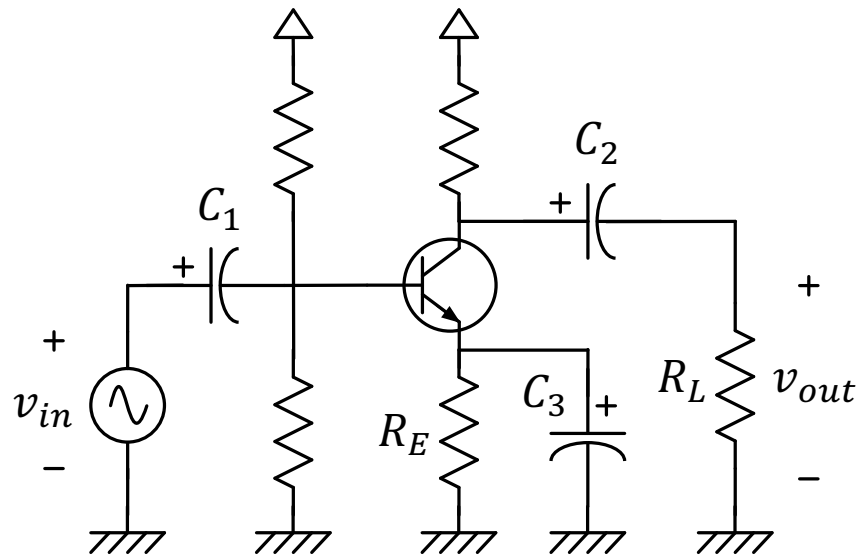
2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Montage AC



- Pour parfaire le montage on ajoute un condensateur de découplage C_3 en parallèle à R_E .
- Celui-ci va permettre de laisser passer le signal DC dans R_E , ce qui est nécessaire pour l'établissement du point de repos Q et va envoyer le signal AC vers la masse.

L'intérêt principal du condensateur de découplage C_3 est d'augmenter considérablement le gain en tension, comme on va le voir dans l'exercice de la partie E.

BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

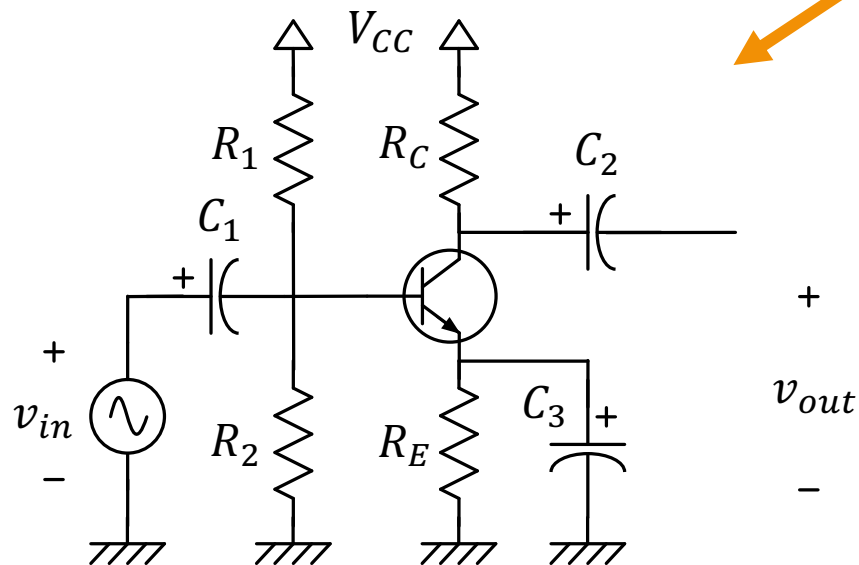
2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Montage AC



Voici le schéma complet de l'amplificateur en AC, polarisé par un diviseur de tension.

On notera :

- L'utilisation des majuscules pour les courants DC et des minuscules pour les régimes variables.
- La charge n'est pas mise. Comme on va le voir, le gain de l'amplificateur ne dépend que des caractéristiques de l'amplificateur lui-même et non de sa charge en sortie.
- La tension v_{out} dépend bien évidemment de la charge R_L en sortie.

BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

- En courant AC, il est nécessaire de tenir compte de la résistance interne (notée r_E) entre la base et l'émetteur. Effectivement comme on court-circuite la résistance R_E en AC grâce au condensateur C_3 , la résistance r_E est la seule résistance qui reste entre la base et l'émetteur. Elle doit donc être prise en compte.

Par définition : $r_E = \frac{v_{BE}}{i_E}$ avec :

- i_E = courant AC dans l'émetteur
- v_{BE} = tension AC entre la base et l'émetteur

- En physique du solide, on montre que cette résistance r_E est égale à :

$$r_E = \frac{26mV}{I_E}$$

avec : I_E = courant DC dans l'émetteur

EXERCICE : Dans le cadre du montage précédent, on a vu que $I_E = 1,1mA$. Calculer la résistance r_E

$$r_E = \frac{26mV}{1,1 \times 10^{-3}} = 23,6 \Omega$$

BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. **Modèle en AC**
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

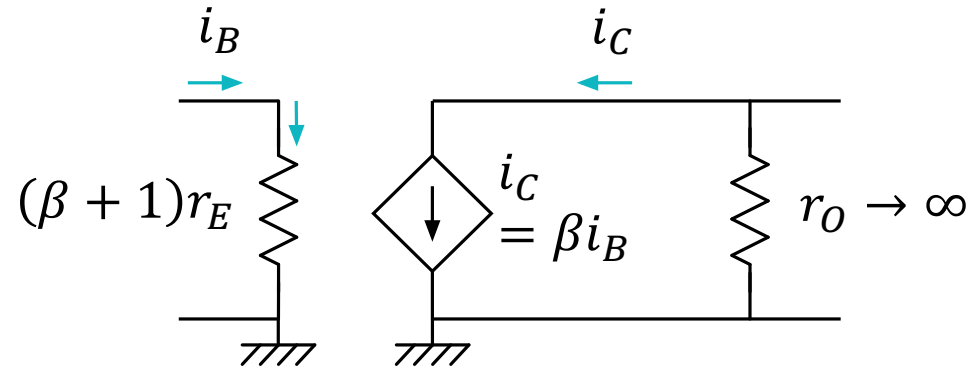
- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Modèle de l'ampli en AC, avec montage en émetteur commun

Tout d'abord, regardons le modèle du transistor en AC. Le modèle retenu dans ce cours est le plus couramment utilisé. C'est le modèle en π .



Remarque : La résistance r_O parfois donnée dans les ouvrages tendant vers l'infini peut être retirée du schéma car au vu de sa valeur aucun courant ne pourra passer dedans.

BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

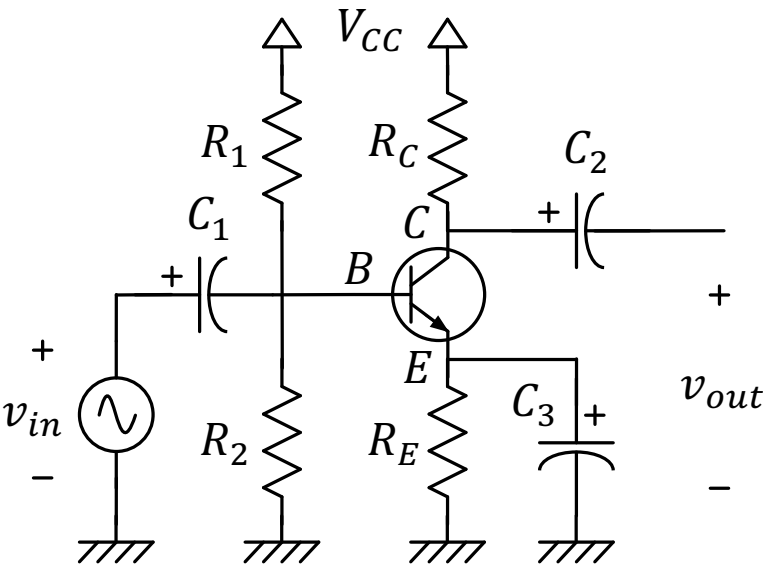
- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. **Modèle en AC**
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

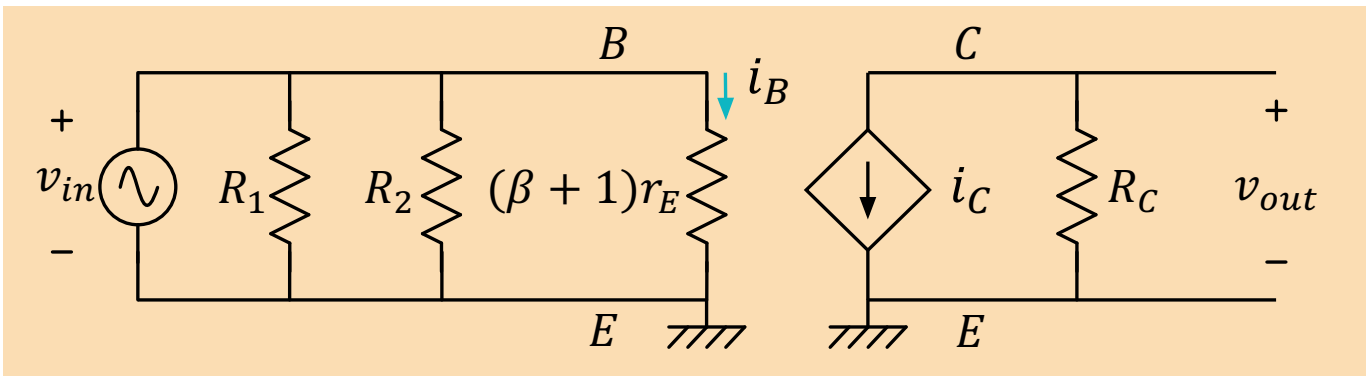
- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP



Pour trouver le modèle équivalent de l'ampli en AC, il faut suivre la méthode suivante :

- Court-circuiter tous les condensateurs de découplage (ici C_3). Donc R_E est court-circuitée, on la « supprime » du schéma.
- Remplacer tous les condensateurs de liaison par des fils (ici C_1 et C_2).
- Remplacer toutes les sources DC par leur impédances internes (qui sont nulles) donc il faut relier R_1 , R_2 et R_C à la masse.
- Remplacer le transistor par son modèle AC en π .

D'où le modèle équivalent de l'ampli en AC :



1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

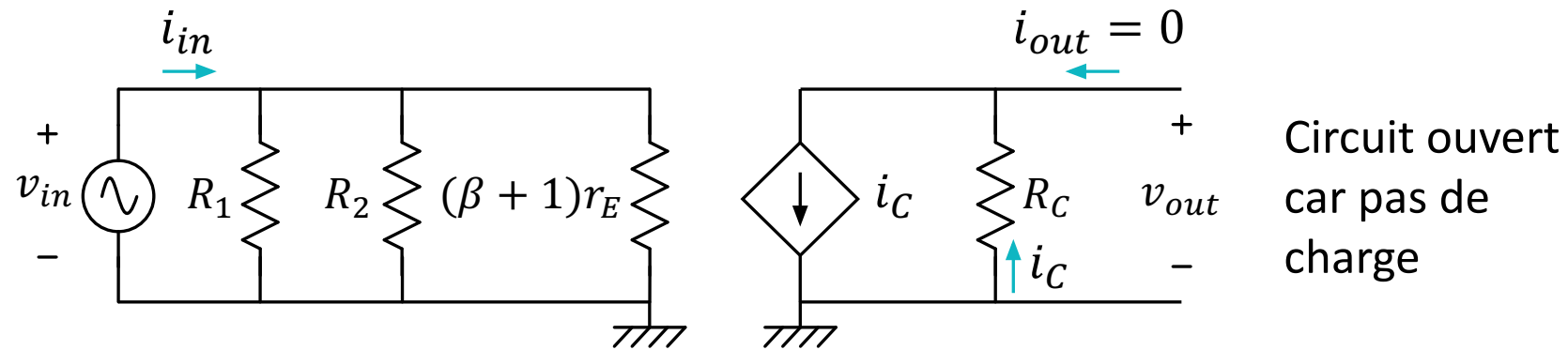
- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Impédance d'entrée de l'ampli

- L'impédance d'entrée d'un amplificateur est la résistance que présente l'amplificateur à un signal d'entrée. Cette résistance détermine combien le signal d'entrée devra fournir comme courant pour générer la tension souhaitée.
- En d'autres termes, l'impédance d'entrée Z_{in} est une mesure de la difficulté avec laquelle un signal d'entrée peut « entrer » dans l'amplificateur. Une haute impédance d'entrée signifie que l'amplificateur ne nécessite qu'une faible intensité de courant pour fonctionner correctement, ce qui est souhaitable car cela minimise l'influence de l'amplificateur sur le circuit source.
- Méthode générale pour la déterminer : c'est l'impédance vue par la source : $Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}}$



$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = R_1 // R_2 // (\beta + 1)r_E$$

$$Z_{in} = 1306 \Omega$$

1. Amplificateur de petits signaux

A. Schéma d'un ampli

B. Résistance AC de l'émetteur

C. Modèle en AC

D. Impédances

E. Gains

E. Modèle général

F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

A. Classe A

B. Classe B

C. Classe AB

D. Classe D

3. Autres applications du BJT

A. Paire Darlington

B. Pont en H

C. Générateur de courant

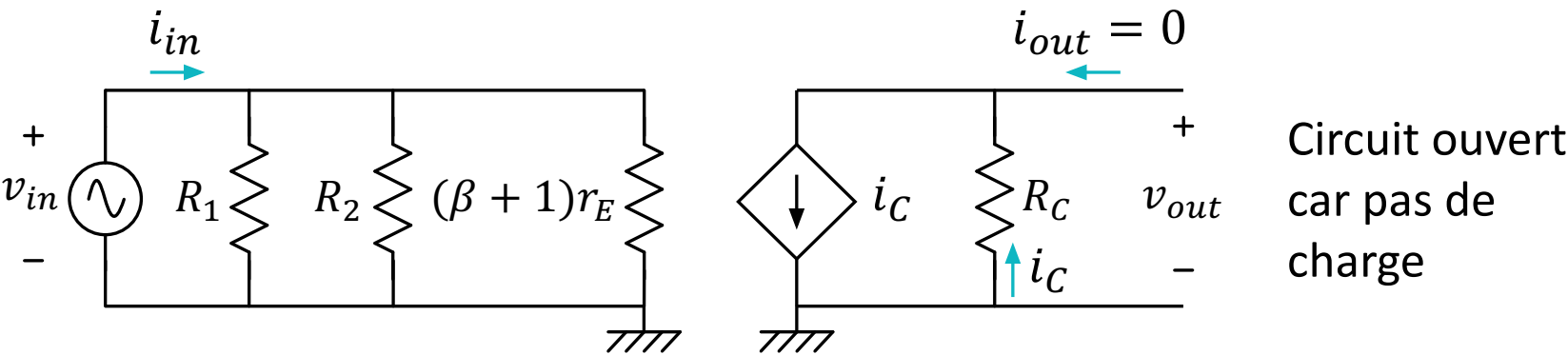
D. Miroir de courant

E. Paire différentielle

F. L'AOP

Impédance de sortie de l'ampli

- L'impédance de sortie d'un amplificateur est la résistance que l'amplificateur présente à la charge qu'il alimente. Cette résistance détermine la capacité de l'amplificateur à fournir du courant à une charge externe et à maintenir une tension de sortie stable.
- Une faible impédance de sortie est souhaitable car elle permet de délivrer plus de courant à la charge sans chute significative de la tension de sortie.
- Méthode générale pour la déterminer : c'est la résistance de Thévenin vue en amont par la charge. Mais ici c'est beaucoup plus simple car les circuits sont découplés.



$v_{out} = -R_C i_C$ Le signe « - » traduit un déphasage de $\frac{\pi}{2}$ entre v_{in} et v_{out} .
Nous n'en tenons pas compte pour l'expression de l'impédance.

Impédance de sortie :

$$Z_{out} = \frac{v_{out}}{i_C} = R_C$$

$Z_{out} = 3600 \, \Omega$

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- F. Amplificateurs

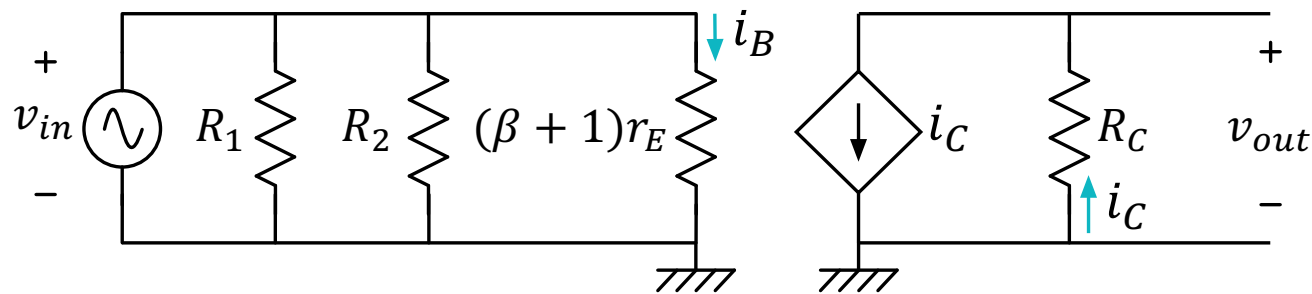
2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Gain à vide (car pas de charge) en tension de l'ampli



Transistor 2N3904, avec
 $V_{CC} = 10V, V_{BE} = 0,7V,$
 $\beta = 200, r_E = 23,6 \Omega$
 $R_1 = 10k\Omega, R_2 = 2,2k\Omega,$
 $R_C = 3,6k\Omega$ et $R_E = 1k\Omega$

- Par définition, le gain à vide en tension A_V est égal à : $A_V = \frac{v_{out}}{v_{in}}$ *Ne pas tenir compte du signe*

Avec : $v_{out} = -R_C i_C = -R_C \beta i_B$
 $v_{in} = (\beta + 1) r_E i_B$ } $\Rightarrow A_V = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{R_C \beta i_B}{(\beta + 1) r_E i_B} \Rightarrow A_V \approx \frac{R_C}{r_E}$

Application numérique : $A_V = 153 \Rightarrow A_V(dB) = 20 \log A_V = 43,7 \text{ dB}$

- Remarque : Si on n'avait pas court-circuité R_E le gain en tension aurait été égal à : $A_V \approx \frac{R_C}{R_E + r_E} = 3,5 \Rightarrow A_V(dB) = 10,9 \text{ dB}$

Conclusion : l'ajout d'un condensateur de découplage C_3 au niveau de R_E a permis d'augmenter considérablement le gain en tension.

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Gain en tension de l'ampli

Remarque sur le gain en tension AC de l'ampli. Celui-ci est égal à : $A_V \approx \frac{R_C}{r_E}$

- On observe que **le gain A_V en AC** dépend de r_E qui est lui-même **dépendant de la température**. (Effectivement, la tension thermique de $26mV$ qui intervient dans le calcul de r_E est donnée pour $T = 300K$ et augmente lorsque la température augmente)
- L'intérêt d'utiliser un montage de polarisation par diviseur de tension est que ça revient à faire une polarisation par l'émetteur, montage très stable en DC par rapport aux variations de la température car β — *indépendant*. (rappel : β dépend de la température). Le point de fonctionnement étant alors très peu sensible aux variations de température, on dit que « **le point de fonctionnement est robuste aux variations de température** ».
- Cet amplificateur en polarisation par l'émetteur sera apprécié dans les zones à fortes variations de température dans la journée, tout en gardant un fonctionnement normal du transistor. (Exemple dans l'espace).

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- F. Amplificateurs

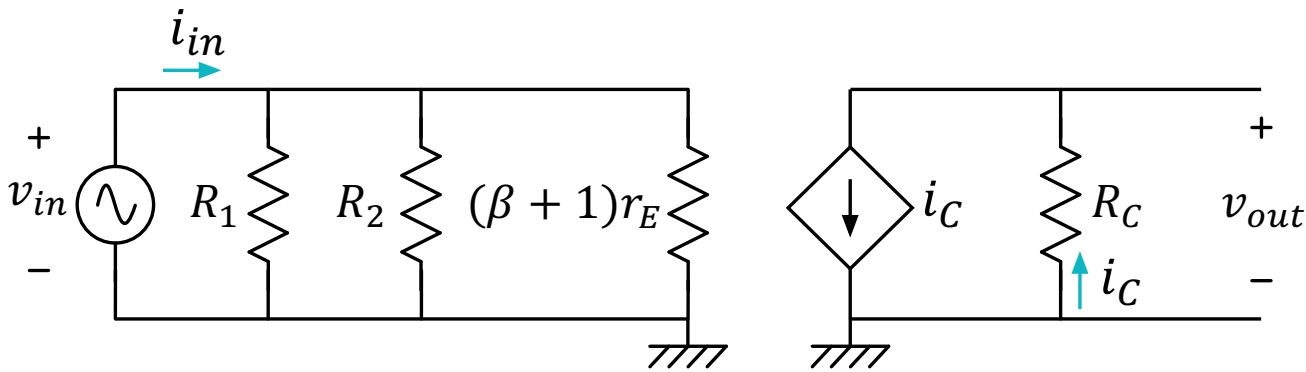
2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Gain en courant de l'ampli



Transistor 2N3904, avec $V_{CC} = 10V$, $V_{BE} = 0,7V$, $\beta = 200$, $r_E = 23,6 \Omega$
 $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 2,2k\Omega$, $R_C = 3,6k\Omega$ et $R_E = 1k\Omega$
 $V_{in,eff} = 10mV$, $A_V = 153$

- Par définition, le gain en courant A_i est égal à : $A_i = \frac{i_C}{i_{in}}$
- On avait trouvé précédemment l'expression de l'impédance d'entrée Z_{in} :
 $Z_{in} = R_1 // R_2 // (\beta + 1)r_E = 1306 \Omega$

$$\Rightarrow i_{in} = \frac{V_{in,eff}}{Z_{in}} = 7,66 \mu A$$

- Déterminons i_C : $i_C = \frac{v_{out}}{R_C} = \frac{A_V V_{in,eff}}{R_C} = 425 \mu A$
- D'où le gain en courant : $A_i = \frac{i_C}{i_{in}} = 55,5 \Rightarrow A_i (dB) = 20 \log A_i = 34,9 dB$

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Gain en puissance de l'ampli

Par définition, le gain en puissance A_P est égal au produit des deux gains précédents :

$$A_P = A_V A_i$$

$$A_P(dB) = 10 \log A_P$$

Dans notre exemple précédent , on trouve :

$$A_P = 153 \times 55,5 = 8460$$

$$\Rightarrow A_P(dB) = 10 \log A_P = \mathbf{39,2 \text{ dB}}$$

BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. **Modèle général**
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

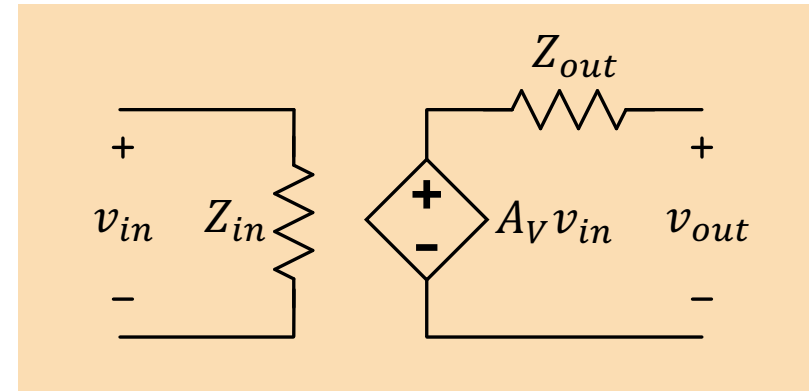
3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

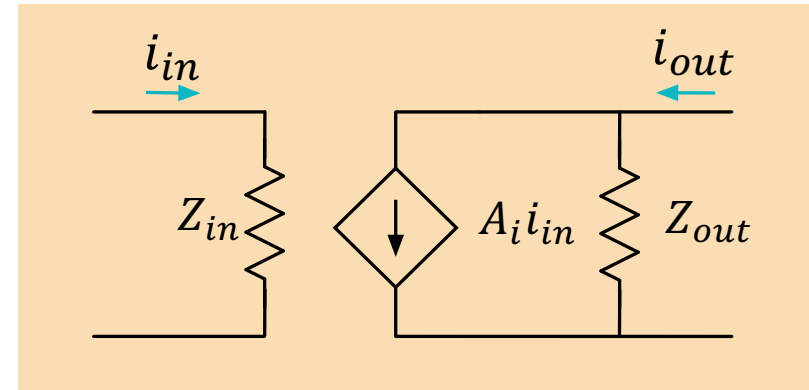
Un amplificateur peut être représenté **de façon générale** par :

- Son impédance d'entrée Z_{in}
- Son impédance de sortie Z_{out}
- Son gain en tension A_V ou son gain en courant A_i

Modèle de l'amplificateur de tension en régime linéaire :



Modèle de l'amplificateur de courant en régime linéaire :



BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général**
- F. Amplificateurs

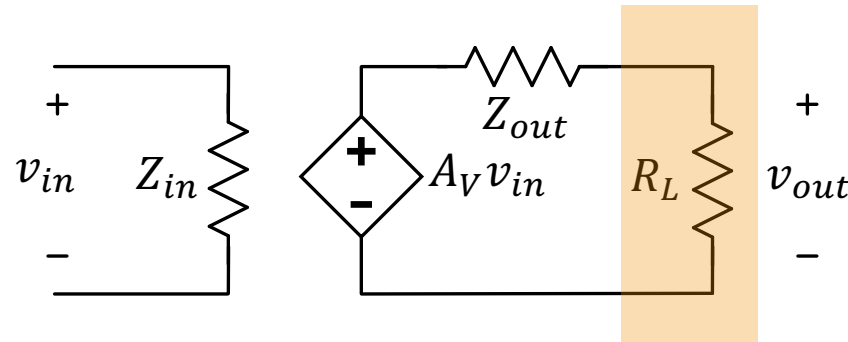
2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

EXERCICE : A partir du schéma équivalent précédent, déterminer la tension de sortie $v_{out,eff}$ de l'ampli soumis à une charge R_L de $1k\Omega$.
On rappelle : $Z_{out} = 3,6k\Omega$, $A_V = 153$, $V_{in,eff} = 10mV$



La résolution se réduit à un simple diviseur de tension :

$$v_{out,eff} = \frac{R_L}{Z_{out} + R_L} A_v V_{in,eff}$$

$$v_{out,eff} = \mathbf{333\ mV}$$

Rappel : v_{in} et v_{out} sont déphasées de $\pi/2$ ce qui implique que si v_{in} est positif alors v_{out} est négatif. Et le gain en tension A_V est négatif.

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. **Modèle général**
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

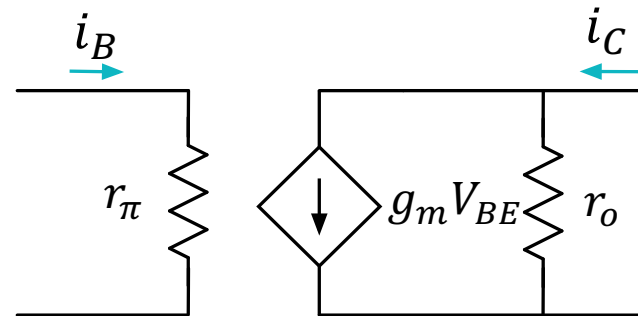
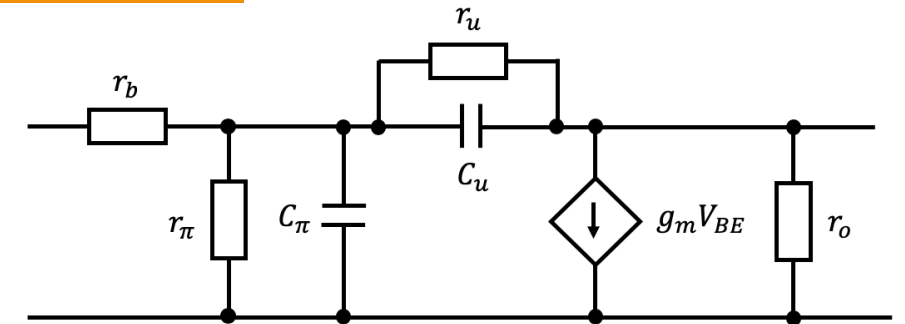
3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Le modèle de Giacoletto

POUR INFO

Le modèle de Giacoletto est un modèle en petits signaux valable pour des fréquences intermédiaires et **hautes fréquences**. Il a été proposé par L.J. Giacoletto en 1969.



$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

Lorsque l'on monte en fréquence, les impédances liées aux capacités parasites diminuent et doivent être prises en compte.

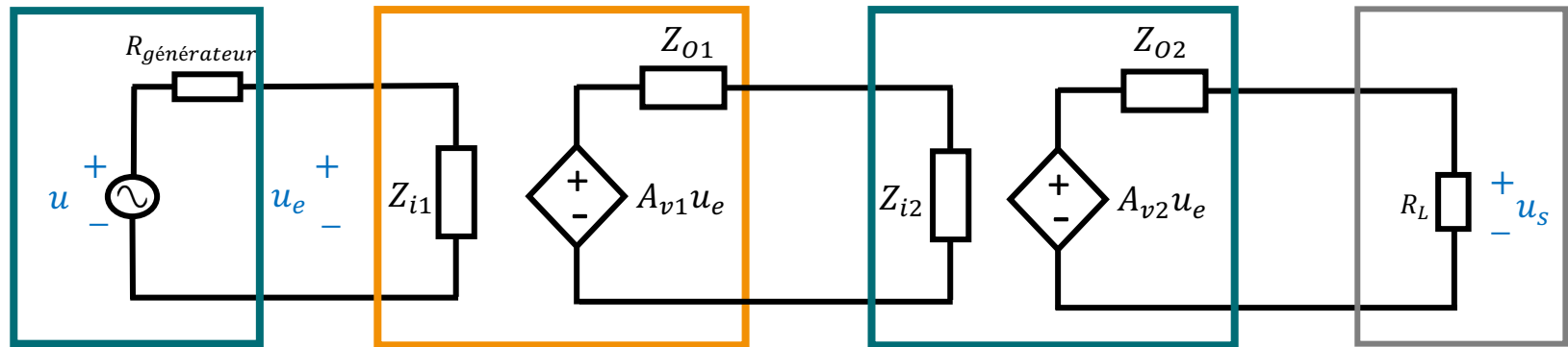
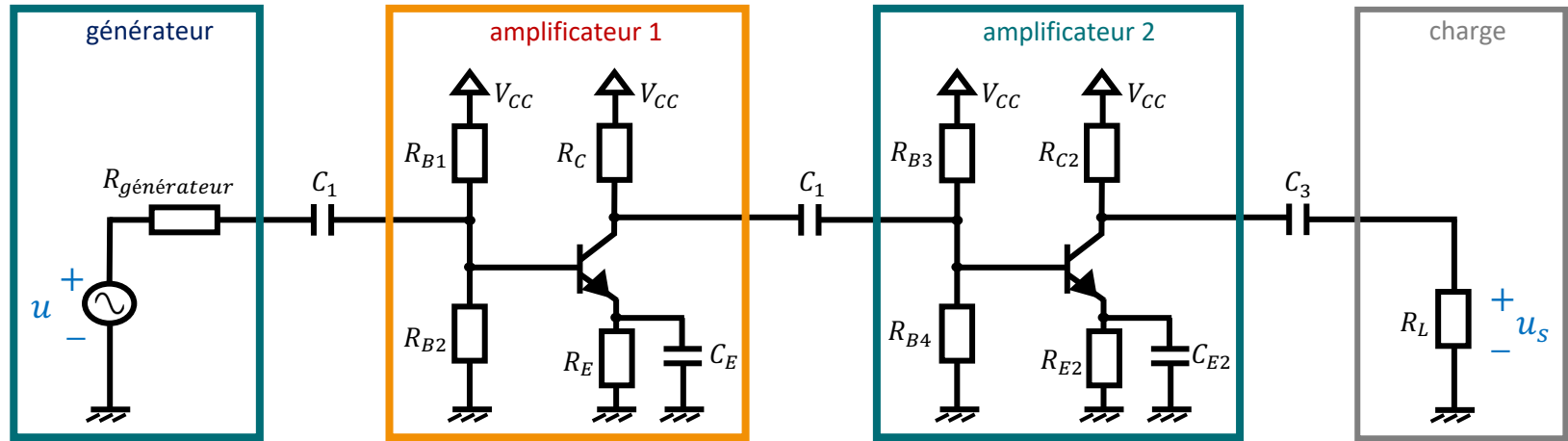
(Dans le cadre de ce cours, nous n'étudierons pas ce cas de figure, ce qui nous permet de négliger les capacités associées et de simplifier le schéma équivalent.)

BJT en dynamique

- 1. Amplificateur de petits signaux
 - A. Schéma d'un ampli
 - B. Résistance AC de l'émetteur
 - C. Modèle en AC
 - D. Impédances
 - E. Gains
 - E. Modèle général
 - F. Amplificateurs
- 2. Amplificateur de puissance
 - A. Classe A
 - B. Classe B
 - C. Classe AB
 - D. Classe D
- 3. Autres applications du BJT
 - A. Paire Darlington
 - B. Pont en H
 - C. Générateur de courant
 - D. Miroir de courant
 - E. Paire différentielle
 - F. L'AOP

Amplificateurs en cascade

Objectif : Amélioration du gain et des impédances d'entrée / sortie d'un ampli



$$A_{v1,L} = \frac{Z_{i2}}{Z_{o1} + Z_{i2}} A_{v1}$$

$$A_{v2,L} = \frac{R_L}{Z_{o2} + R_L} A_{v2}$$

$$A_{v,TOT,L} = A_{v1,L} \cdot A_{v2,L}$$

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

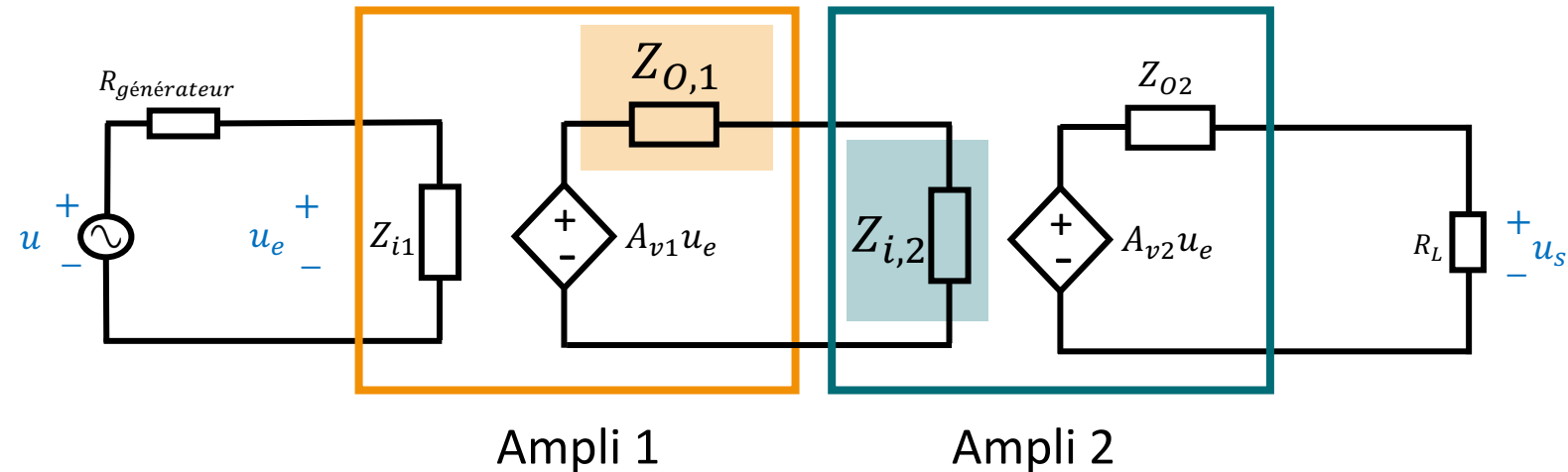
2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Amplificateurs en cascade et adaptation d'impédance



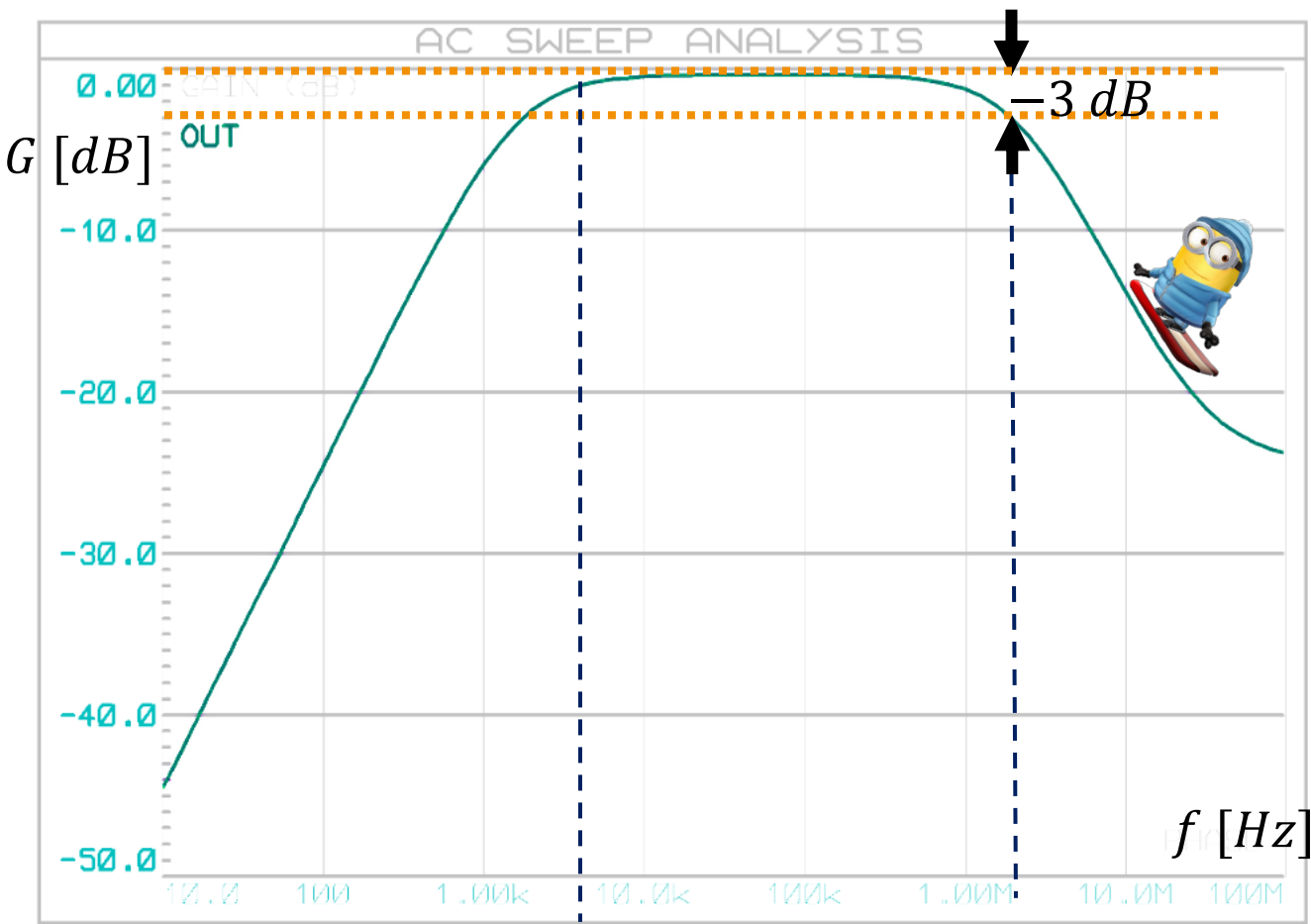
Remarque très importante :

- Si l'impédance de sortie $Z_{O,1}$ du 1^{er} ampli est égale à l'impédance d'entrée $Z_{i,2}$ du 2nd ampli alors le 1^{er} ampli transfère au 2nd le maximum de puissance, **c'est ce qu'on appelle l'adaptation d'impédance**.
- Evidemment, c'est ce que l'on cherche toujours à avoir lorsque l'on associe en cascade les amplificateurs.

BJT en dynamique

- 1. Amplificateur de petits signaux
 - A. Schéma d'un ampli
 - B. Résistance AC de l'émetteur
 - C. Modèle en AC
 - D. Impédances
 - E. Gains
 - E. Modèle général
 - F. Amplificateurs
- 2. Amplificateur de puissance
 - A. Classe A
 - B. Classe B
 - C. Classe AB
 - D. Classe D
- 3. Autres applications du BJT
 - A. Paire Darlington
 - B. Pont en H
 - C. Générateur de courant
 - D. Miroir de courant
 - E. Paire différentielle
 - F. L'AOP

Complément : Bande passante d'un émetteur commun



Transistor 2N2222

Limitation en HF
= effet des capacités internes du transistor

Limitation en BF
= effet des condensateurs de couplage



BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Amplificateur de puissance

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

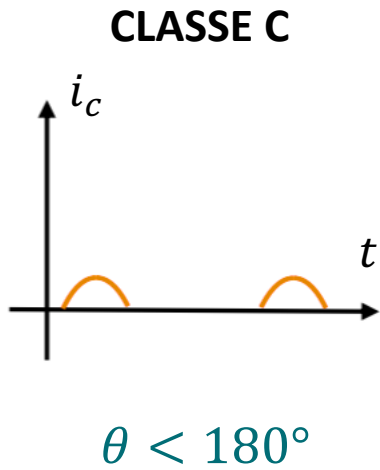
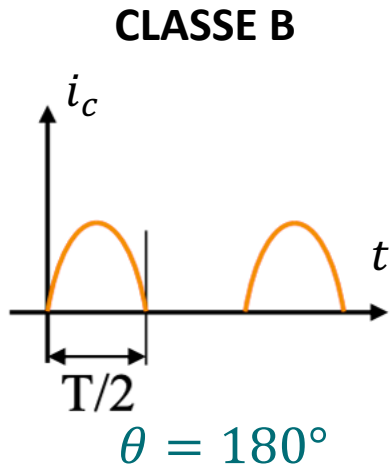
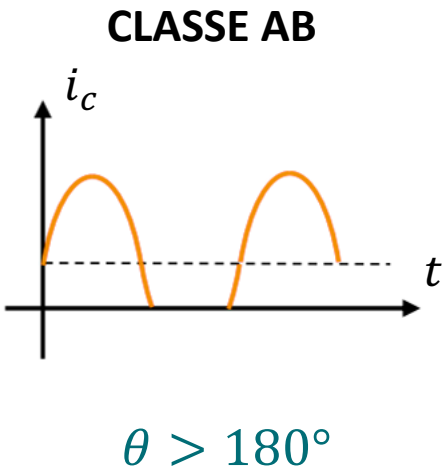
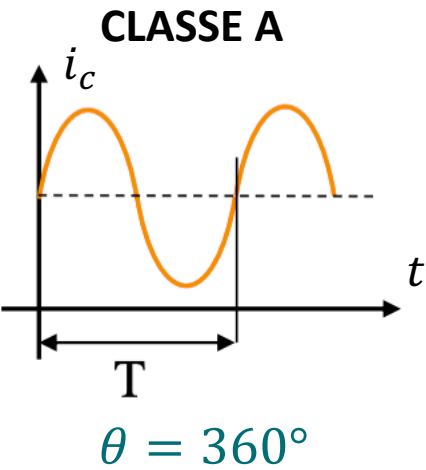
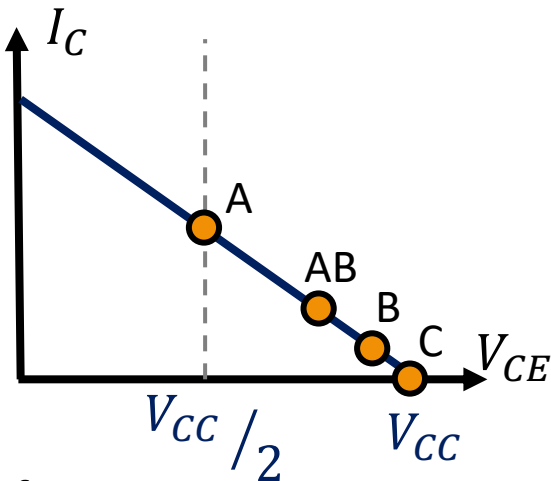
- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Classes d'amplification

- La classe d'un amplificateur linéaire permet de connaître la façon dont est polarisé le transistor qui amplifie.
- Cela influe principalement sur :
le **rendement** : transmission du maximum d'énergie à la charge ?
la **linéarité** : est-ce que la « forme » du signal de sortie est fidèle ?
- La classe est liée à la durée pendant laquelle les transistors sont actifs. Cette durée est mesurée en degrés d'un signal sinusoïdal test appliqué à l'entrée de l'amplificateur, 360° correspondant à un cycle complet :



1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

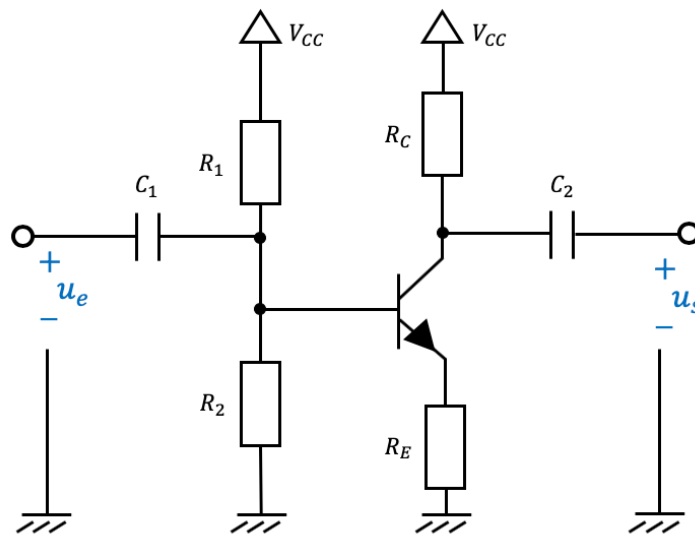
3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Les amplificateurs de classe A

- Les **amplificateurs de classe A** sont les amplificateurs de puissance analogiques les plus répandus. Ils amplifient la totalité du signal.
- Pour ce faire, le point de repos Q doit être au milieu de la droite de charge : $V_{CE} = \frac{V_{CC}}{2}$

EXEMPLE : ÉMETTEUR COMMUN



La distorsion du signal est minimale.



Le transistor est toujours actif et donc consomme de l'énergie même pour un signal en entrée nul.



Ils chauffent beaucoup

→ faible rendement ($\eta = \frac{P_{TRANSMISE}}{P_{CONSOMMEE}} \leq 50 \%$)

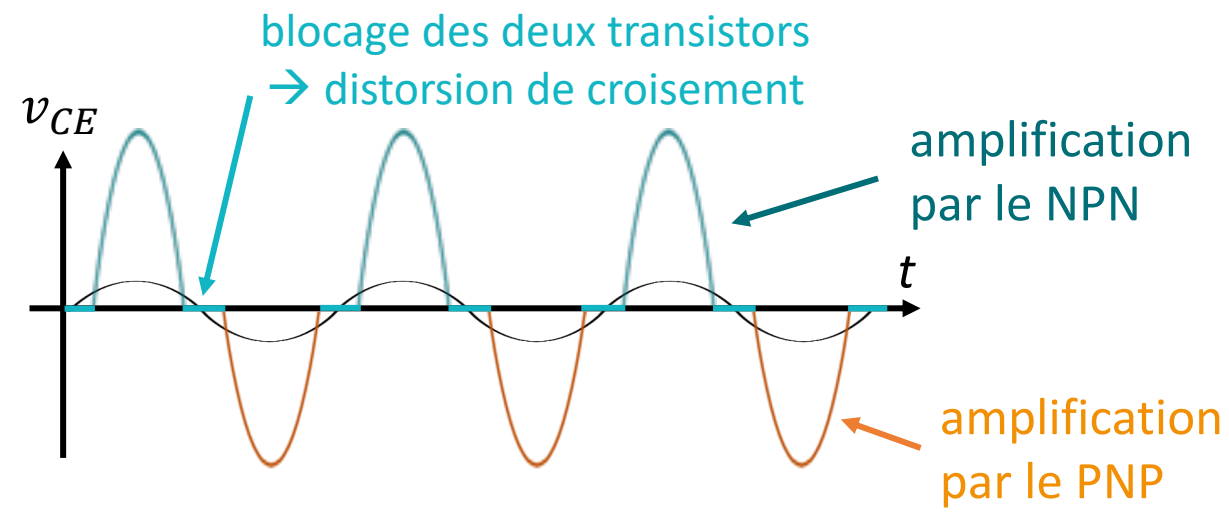
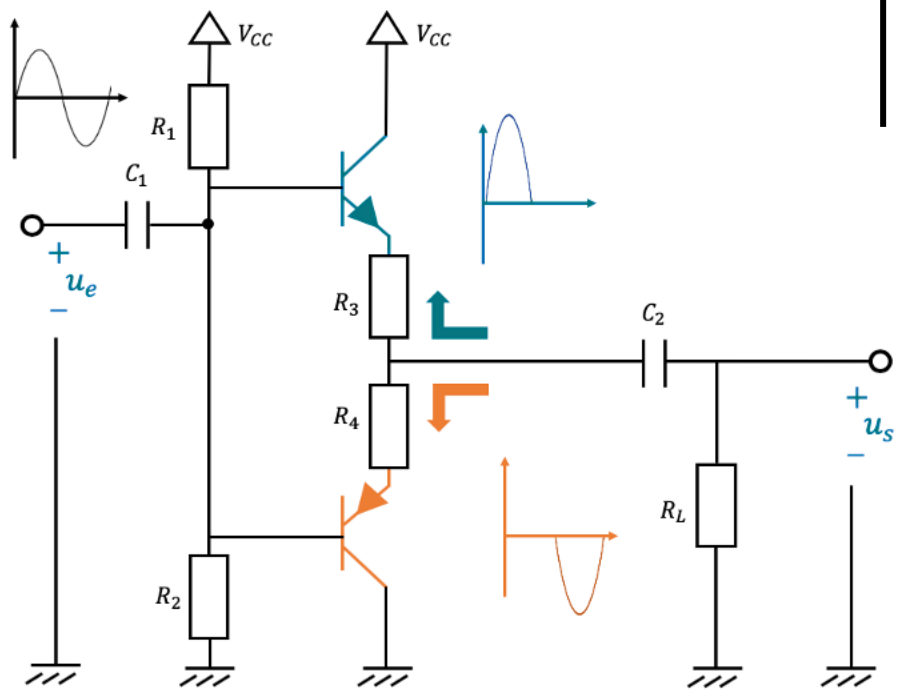
BJT en dynamique

- 1. Amplificateur de petits signaux
 - A. Schéma d'un ampli
 - B. Résistance AC de l'émetteur
 - C. Modèle en AC
 - D. Impédances
 - E. Gains
 - E. Modèle général
 - F. Amplificateurs
- 2. Amplificateur de puissance
 - A. Classe A
 - B. Classe B
 - C. Classe AB
 - D. Classe D
- 3. Autres applications du BJT
 - A. Paire Darlington
 - B. Pont en H
 - C. Générateur de courant
 - D. Miroir de courant
 - E. Paire différentielle
 - F. L'AOP

Les amplificateurs de classe B

Les **amplificateurs de classe B** sont les amplificateurs de puissance analogiques dont le point de polarisation des transistors est en zone de blocage. Les transistors ne sont passants que sur une alternance.

EXEMPLE : PUSH-PULL



- ✓ En l'absence de signal d'entrée ou sur l'alternance négative, le signal de sortie est nul → meilleur rendement ($\eta \leq 78,5 \%$)
- ✗ **distorsion de croisement** (distorsion du signal)
- ✗ Le gain est unitaire.

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

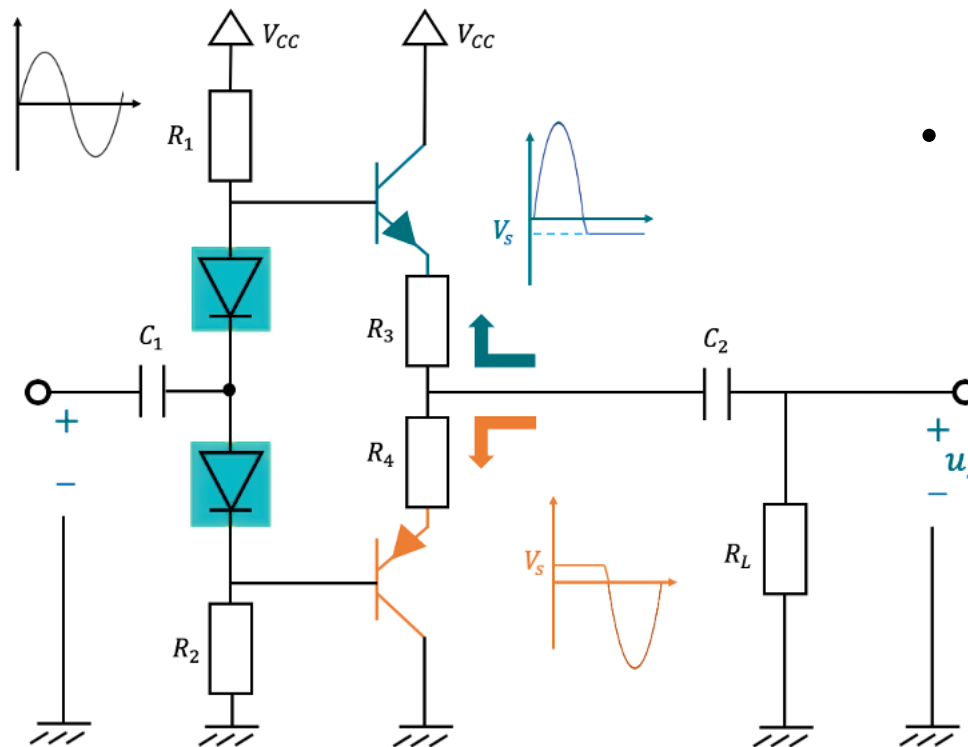
- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Les amplificateurs de classe AB

EXEMPLE : PUSH-PULL à diodes



- Les amplificateurs de type AB forment une classe intermédiaire entre les classes A et B.
- Deux diodes sont ajoutées au montage push-pull afin de contrer la distorsion de croisement.
- Il en résulte que les transistors conduisent sur plus de 180° et on parle donc de classe AB.



Réduction de la distorsion de croisement (bonne linéarité)



Bon compromis entre rendement ($50\% \leq \eta \leq 78,5\%$) et linéarité



Basse impédance d'entrée

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

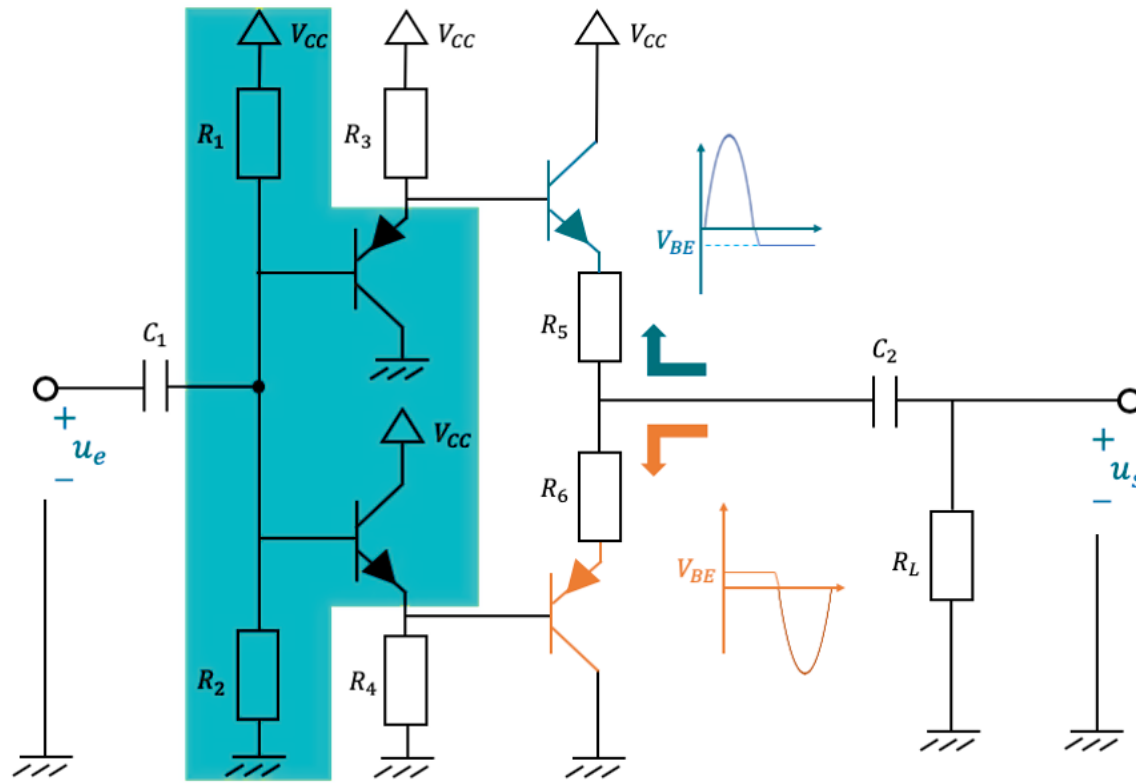
- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Les amplificateurs de classe AB - 2nd montage

EXEMPLE : PUSH-PULL à collecteurs communs



- Le montage précédent avait comme désavantage que l'impédance d'entrée est basse (seulement les résistances équivalentes aux diodes).
- Une solution est de brancher des collecteurs communs en amont (les jonction B-E jouent le rôle des diodes précédentes).
- Autre solution : brancher un AOP.



Réduction de la distorsion de croisement (bonne linéarité)



Bon compromis entre rendement ($50 \% \leq \eta \leq 78,5 \%$) et linéarité



Haute impédance d'entrée

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

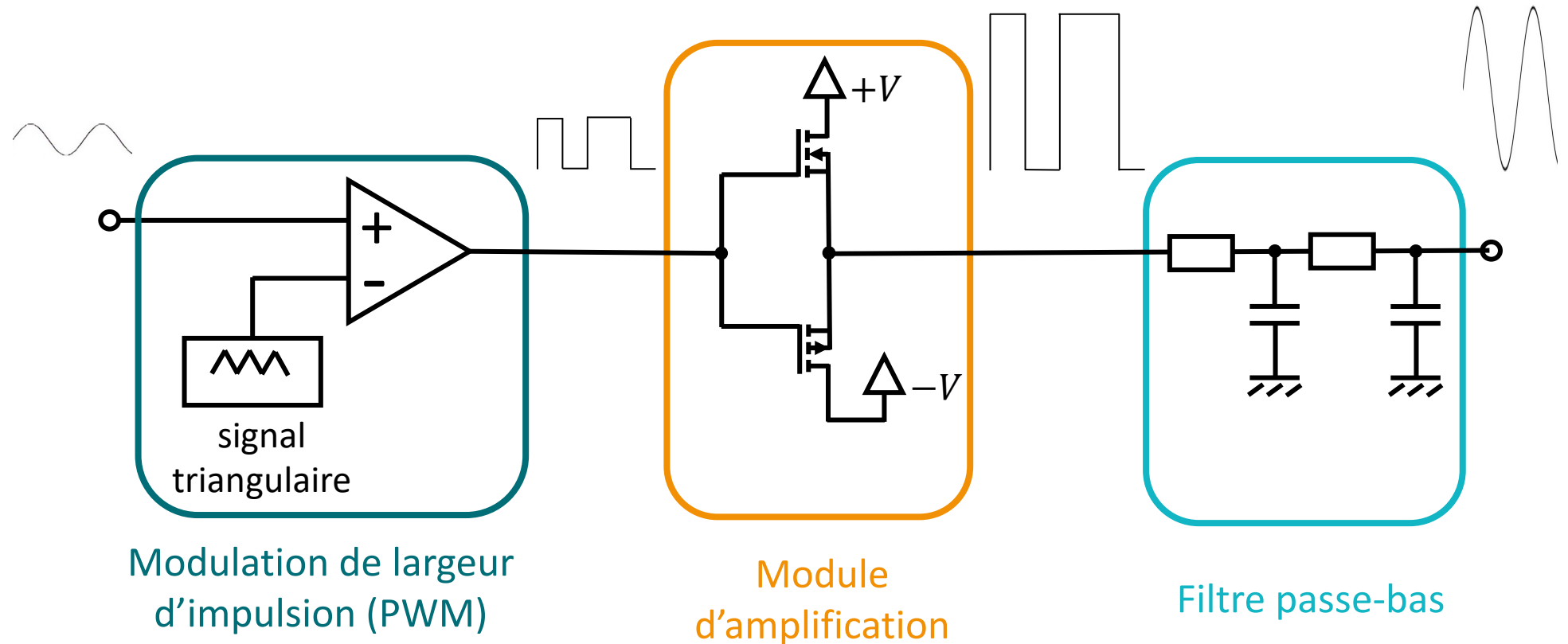
3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Les amplificateurs de classe D

POUR INFO

- Les amplificateurs de classe D correspondent à une classe travaillant avec des signaux rectangulaires. ('D' pour *Digital* mais il ne s'agit pas d'amplificateur numérique dans le sens où ils ne reçoivent pas de données binaires !).
- Le signal est modulé en largeur d'impulsions, amplifié à l'aide d'un amplificateur push-pull à transistors FET puis filtré afin de récupérer la forme du signal originel.



BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

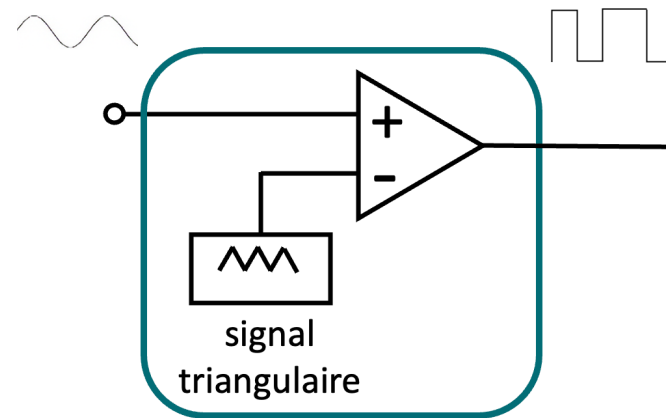
3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

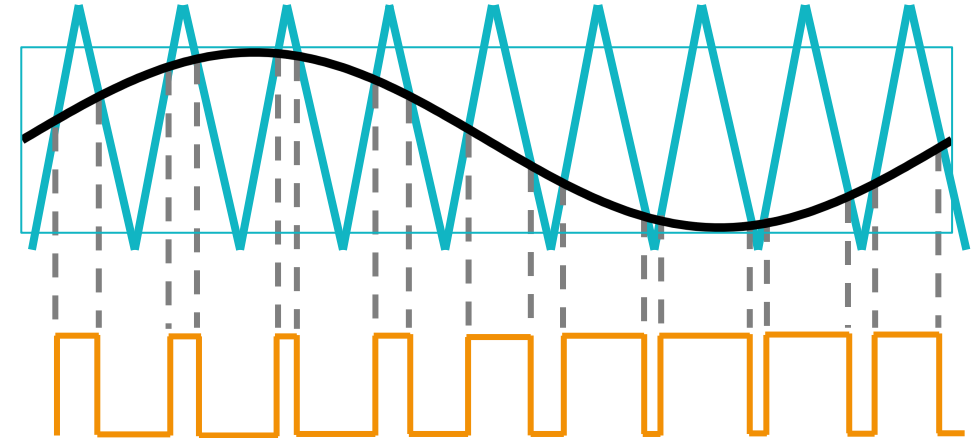
POUR INFO

Le modulateur de largeur d'impulsions compare le signal d'entrée à un signal triangulaire :

- lorsque $V^+ > V^-$, la sortie vaut $+V_{SAT} \approx +V_{REF}$
- lorsque $V^+ < V^-$, la sortie vaut $-V_{SAT} \approx -V_{REF}$



Modulation de largeur d'impulsion (PWM)



- L'étage d'après amplifie les états hauts et bas à l'aide d'un push-pull à transistors FET, et la forme du signal est restituée à l'aide d'un filtre passe-bas.
- Les amplificateurs de classe D présentent un très bon rendement et chauffent donc très peu.

BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

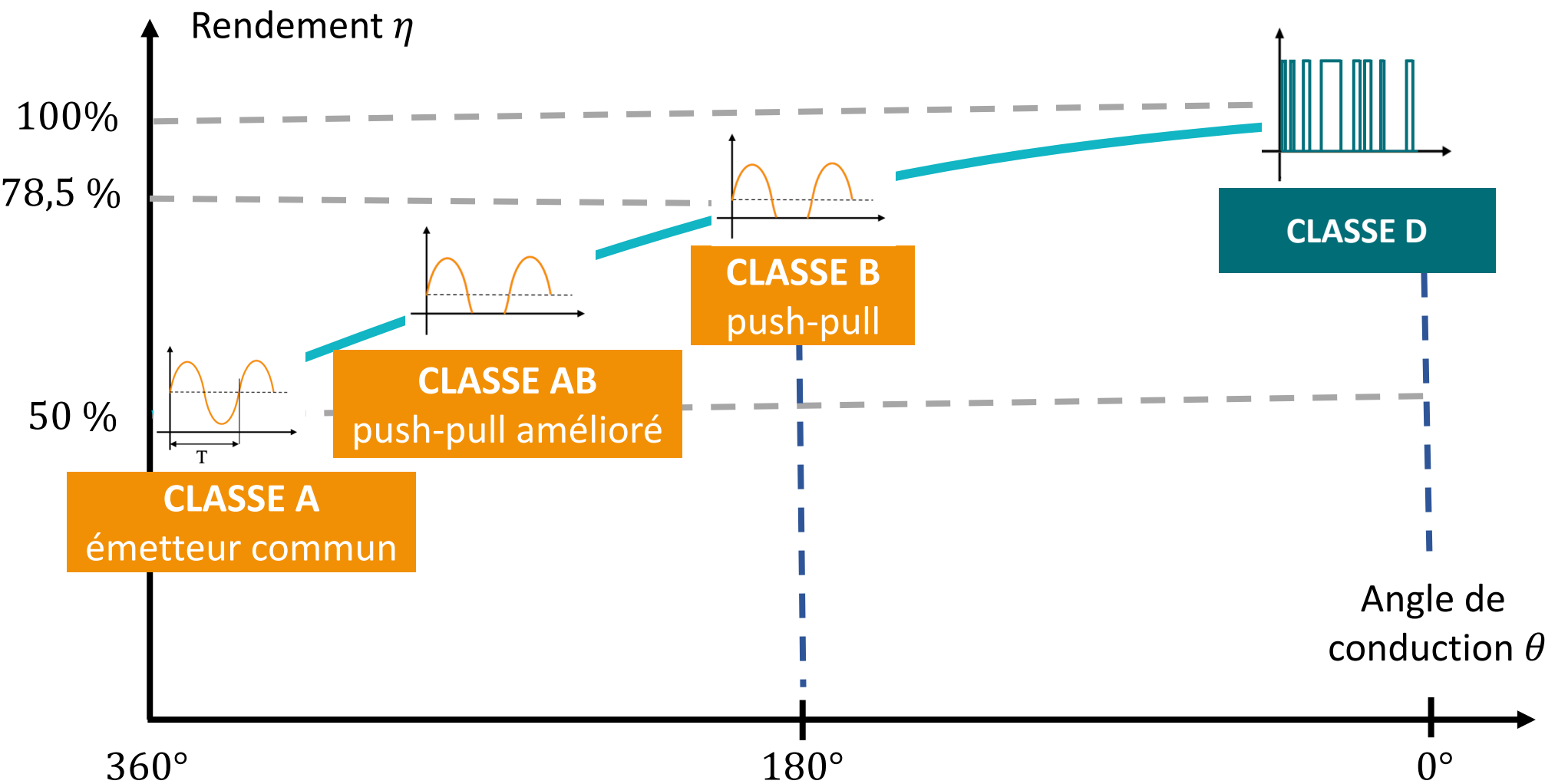
2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Comparaison des rendements des ampli de puissance en fonction de leur classe



BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Autres applications du BJT

BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

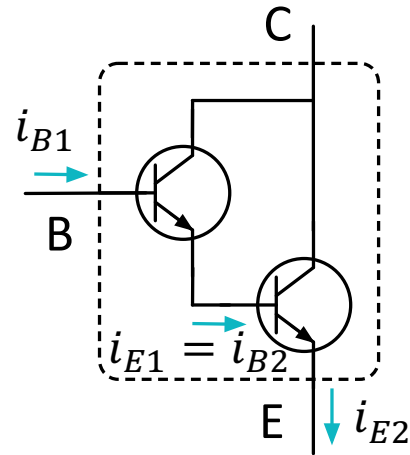
- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

La paire Darlington

Objectif : avoir un **gain en courant β** important.



Gain en courant d'une paire Darlington

$$\beta_D \approx \beta_1 \cdot \beta_2$$

Exemple : BDX53B, $\beta_D = 750$

POUR INFO

Pour le premier transistor :

$$i_{E1} = i_{C1} + i_{B1} = \beta_1 i_{B1} + i_{B1} = (\beta_1 + 1) i_{B1}$$

Puisque $i_{E1} = i_{B2}$, on a $i_{B2} = (\beta_1 + 1) i_{B1}$

Pour le second transistor :

$$i_{E2} = (\beta_2 + 1) i_{B2} = (\beta_2 + 1)(\beta_1 + 1) i_{B1}$$

$$\text{Finalement, } \beta_D = \frac{i_{E2}}{i_{B1}} = \frac{(\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1) i_{B1}}{i_{B1}} \approx \beta_1 \beta_2$$



Augmentation par un facteur β de l'impédance d'entrée.



Diminution d'un facteur 2 du gain en tension en émetteur commun

BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Le pont en H

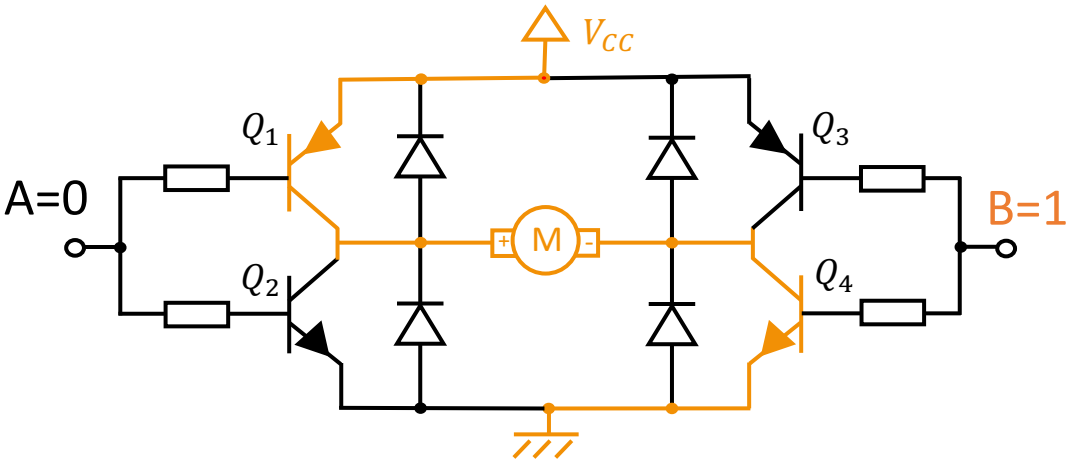
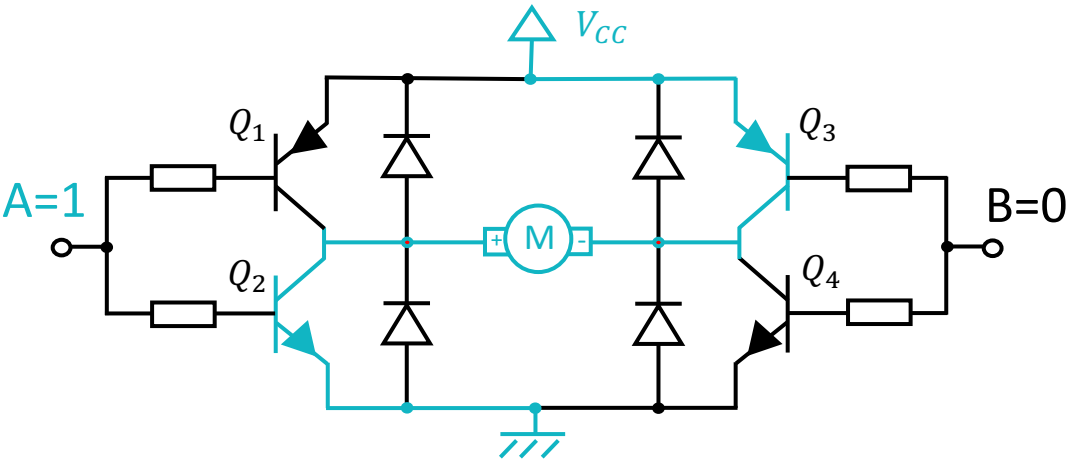
Objectif : **Contrôler la polarité aux bornes d'un dipôle**, par exemple un moteur DC, pour qu'il tourne dans un sens ou dans l'autre.

Activation logique de la pin A du microcontrôleur à l'état haut

Le transistor est passant si la jonction BE est passante, sinon il est bloqué.

Activation logique de la pin B à l'état haut

En inversant la polarité, ce sont les deux autres transistors qui deviennent passants, le courant a changé de sens de circulation, le moteur tourne alors dans l'autre sens.



1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

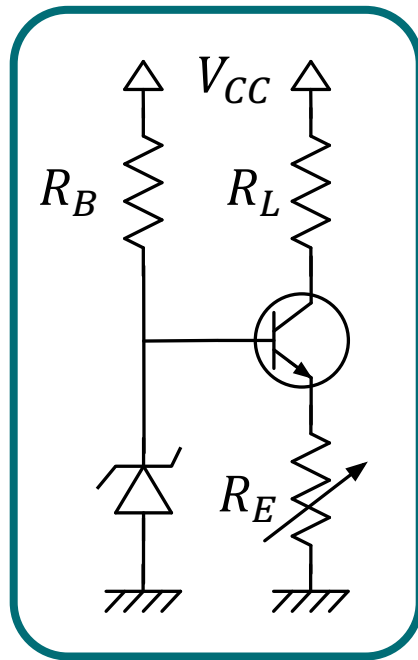
2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Le générateur de courant



générateur de courant DC

- Objectif : **fournir un courant constant à une charge.**

Grâce à la diode Zéner, le potentiel à l'émetteur est constant et vaut $V_E = V_Z - V_{BE}$.

La loi d'Ohm donne le courant dans la résistance émetteur :

$$i_E = \frac{V_Z - V_S}{R_E}$$

Puisque $i_C \approx i_E$, on a $i_L \approx \frac{V_Z - V_S}{R_E}$

Le courant qui circule dans la résistance de charge est donc indépendant de la valeur de cette dernière.

- Limitations :

- La droite de charge a pour équation $V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)i_L$ or V_{CE} ne peut pas devenir inférieure à $V_{CE,SAT}$: si R_C est trop grande, la régulation de tension ne fonctionne plus.
- Pour obtenir $i_L \approx cste$, il faut que les coefficients de température du transistor et de la diode soient identiques ce qui est difficile à obtenir, on utilise plutôt le miroir de courant.

BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

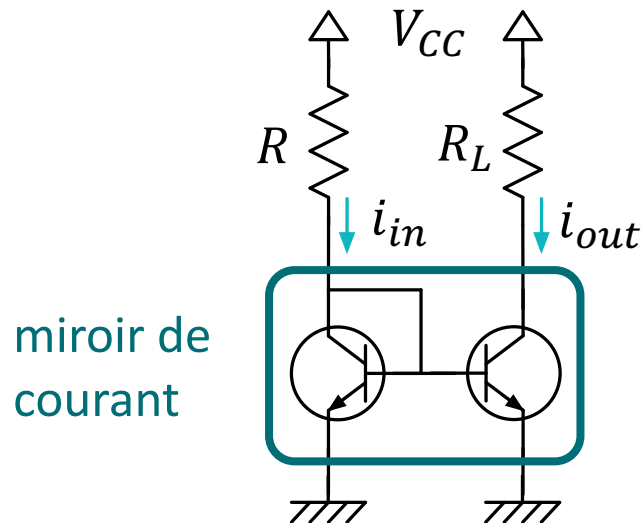
- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant**
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Le miroir de courant

- Objectif : copier le courant entrant d'un côté du miroir i_{in} de l'autre côté du miroir quelque soit la charge R_L .
- Montage très employé dans les circuits intégrés pour garantir une polarisation identique pour deux transistors.



Miroir de courant

$$i_{OUT} \approx i_{IN}$$

POUR INFO

$$i_{E1} = i_{B1} + i_{C1} = i_{B1} + \beta i_{B1} = (\beta + 1)i_{B1} \Leftrightarrow i_{B1} = \frac{i_{E1}}{\beta + 1} \approx \frac{i_{E1}}{\beta} \quad (1)$$

De la même manière, on peut écrire que $i_{B2} \approx \frac{i_{E2}}{\beta} \quad (2)$

Les deux émetteurs sont reliés à la masse donc $V_{BE1} = V_{BE2}$

Et comme les deux transistors sont identiques, $i_{B1} = i_{B2} = i_B \quad (3)$

(1) Et (2) dans (3) : $\frac{i_{E1}}{\beta} = \frac{i_{E2}}{\beta}$ donc $i_{E1} = i_{E2} = i_E$

On cherche à exprimer i_{in}

Loi des mailles : $V_{CC} - Ri_{in} - V_{BE} = 0 \Leftrightarrow i_{in} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R}$

A : $i_{in} = i_{B1} + i_{B2} + i_{C1} = 2i_B + i_E = 2\frac{i_E}{\beta} + i_E = \frac{\beta + 2}{\beta} i_E$

D'où $i_{in} = \frac{\beta + 2}{\beta} i_E \approx i_E$ Remarque : expression peu sensible en β .

Or $i_{E2} = i_{out} + i_{B2} \approx i_{out}$. Donc finalement, $i_{out} \approx i_{in}$

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

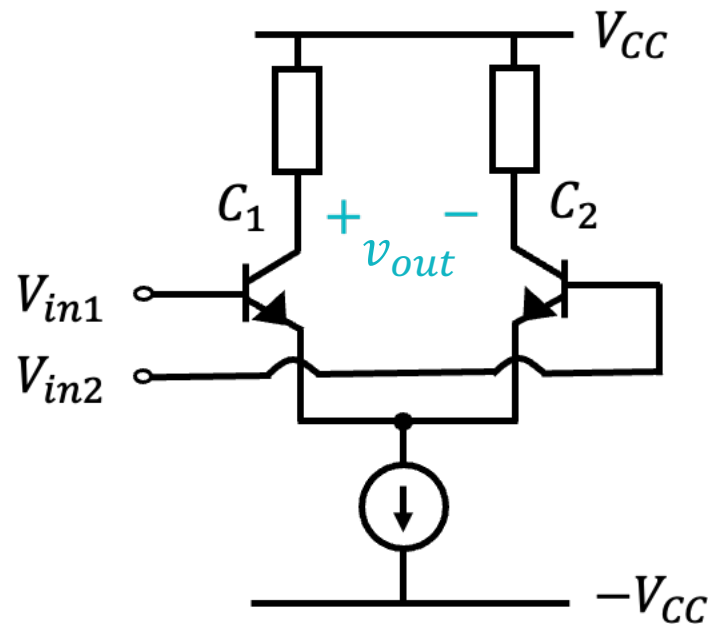
3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

La paire différentielle

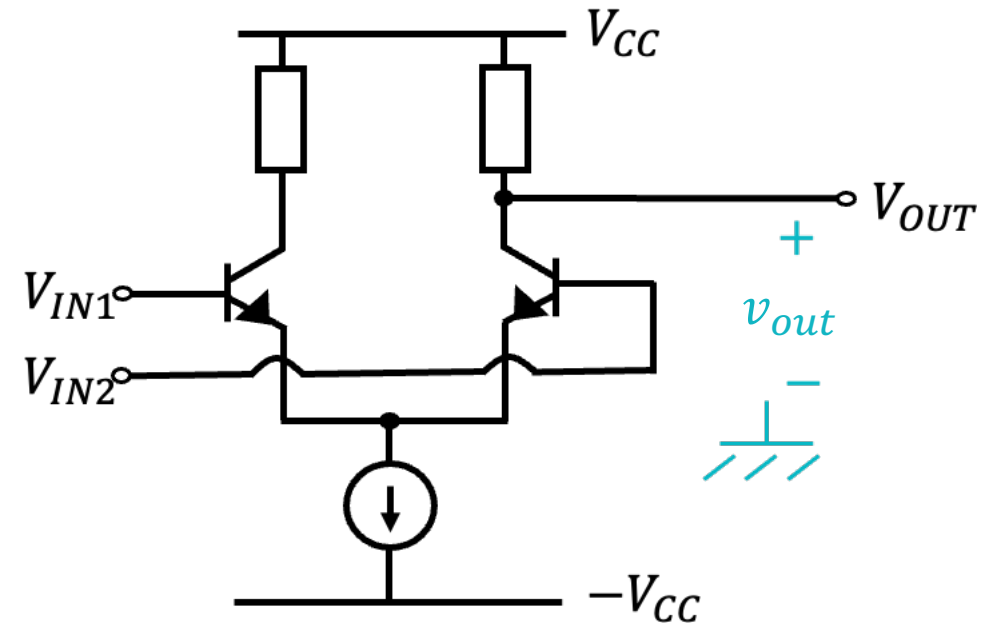
- Objectif : **obtenir en sortie une tension reflet du différentiel entre les deux tensions d'entrée**, la sortie étant différentielle ou non.

montage à sortie différentielle



$$v_{out} = V_{C1} - V_{C2}$$

montage à sortie non - différentielle



$$v_{out} = V_{C2}$$

1. Amplificateur de petits signaux

A. Schéma d'un ampli

B. Résistance AC de l'émetteur

C. Modèle en AC

D. Impédances

E. Gains

E. Modèle général

F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

A. Classe A

B. Classe B

C. Classe AB

D. Classe D

3. Autres applications du BJT

A. Paire Darlington

B. Pont en H

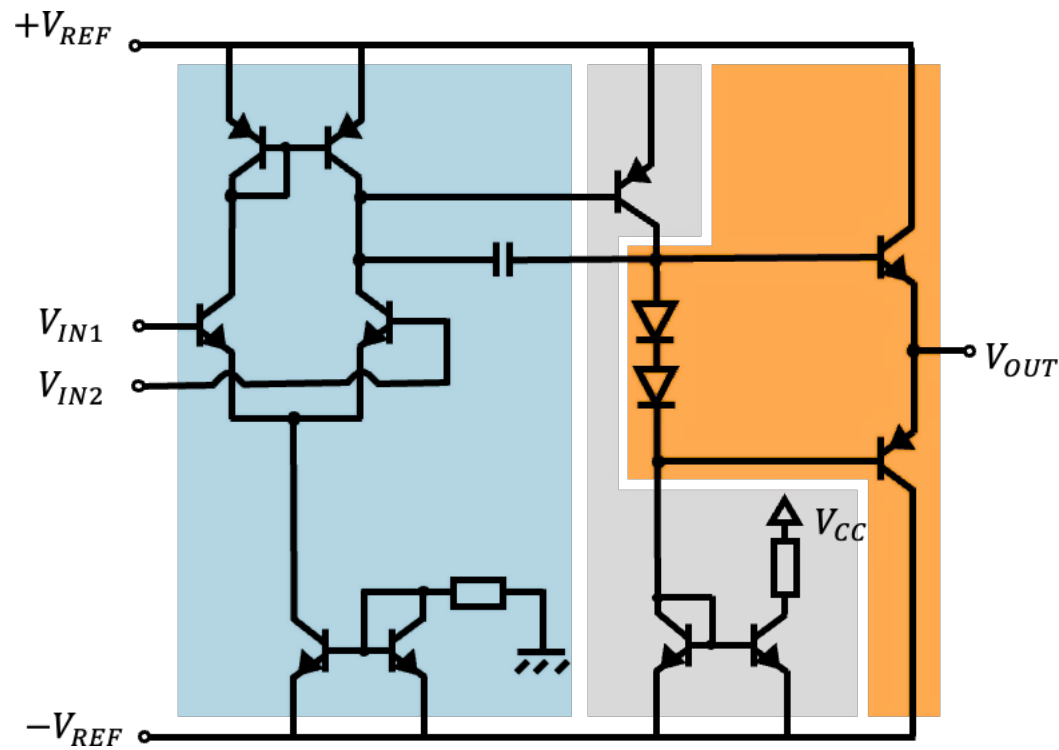
C. Générateur de courant

D. Miroir de courant

E. Paire différentielle

F. L'AOP

L'amplificateur opérationnel



Principe de fonctionnement

- Un AOP dans sa version la plus simple comprend trois étages :
- **Paire différentielle** : gain en tension et rejet du mode commun, Z_{in} élevée
- Et pour l'amplification :
- **émetteur commun** : gain en tension
 - **Push-pull** : gain en tension de 1 mais un fort gain en courant. Z_o quasi-nulle.

BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

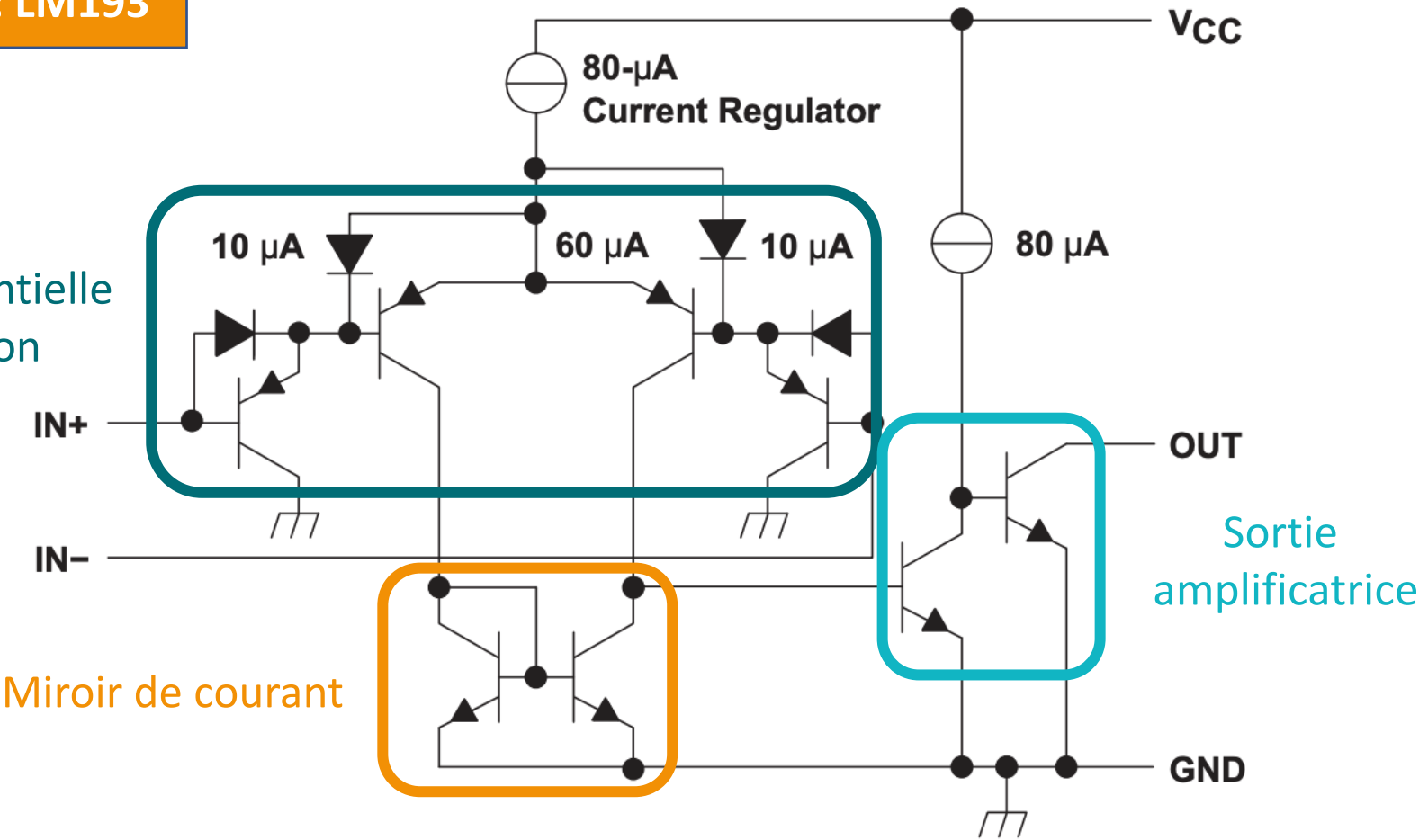
- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

EXEMPLE : LM193

Paire différentielle
Darlington



BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

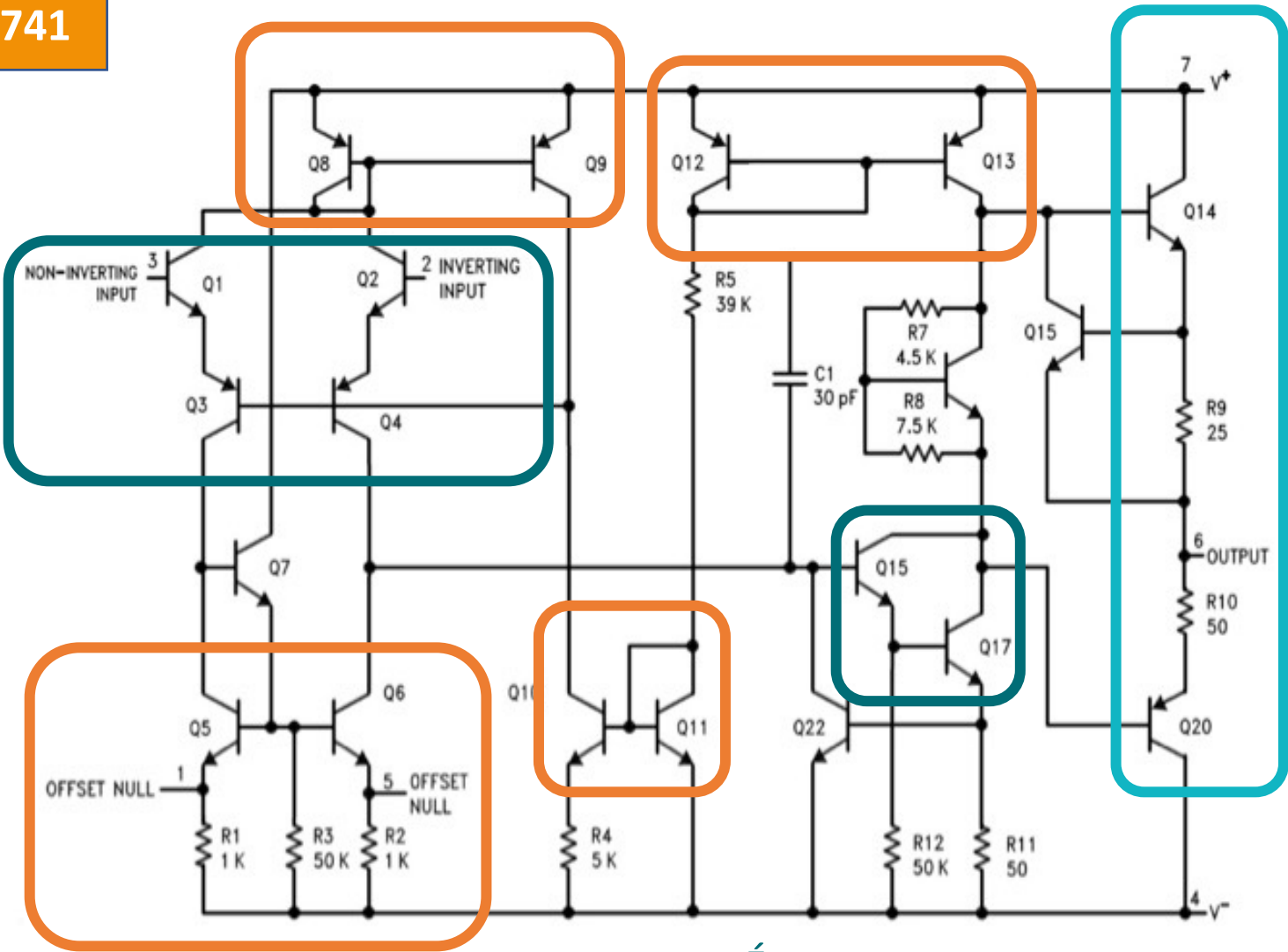
EXEMPLE : LM741

Paire différentielle Darlington

Miroirs de courant

Miroirs de courant

Sortie push-pull



Émetteur commun Darlington

BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

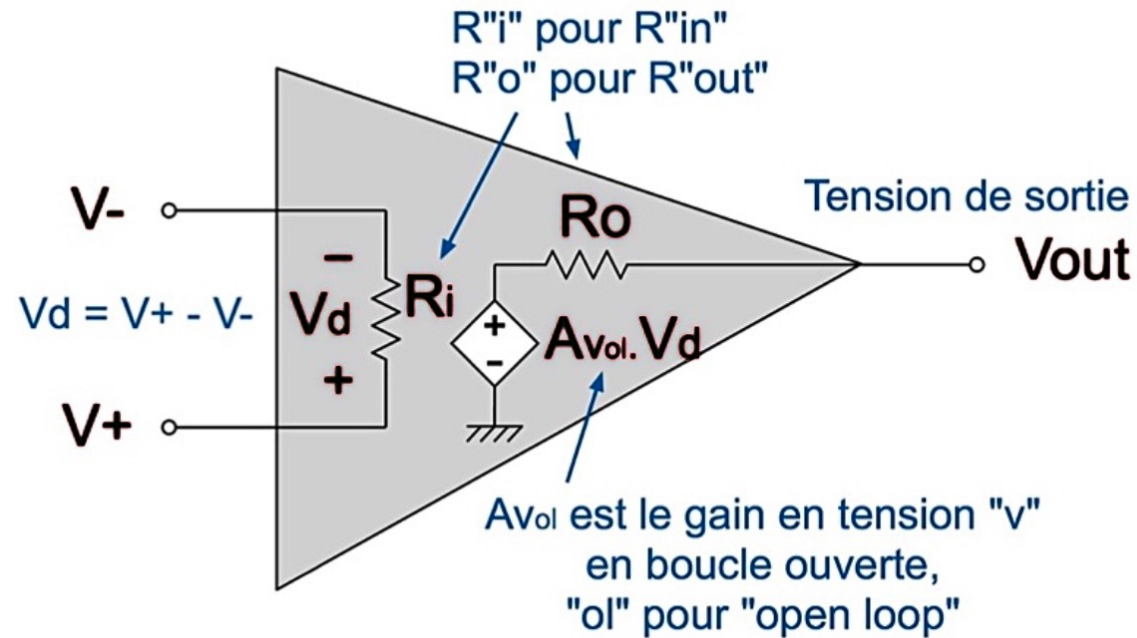
2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Modèle de l'amplificateur opérationnel



AOP idéal

$$Z_{IN} = \infty$$

$$Z_{OUT} = 0$$

$$A_d = \infty$$

AOP réel

$$Z_{IN} \sim 2 \text{ M}\Omega$$

$$Z_{OUT} \sim 50 \text{ }\Omega$$

$$A_d \sim 10^5$$

BJT en dynamique

1. Amplificateur de petits signaux

- A. Schéma d'un ampli
- B. Résistance AC de l'émetteur
- C. Modèle en AC
- D. Impédances
- E. Gains
- E. Modèle général
- F. Amplificateurs

2. Amplificateur de puissance

- A. Classe A
- B. Classe B
- C. Classe AB
- D. Classe D

3. Autres applications du BJT

- A. Paire Darlington
- B. Pont en H
- C. Générateur de courant
- D. Miroir de courant
- E. Paire différentielle
- F. L'AOP

Fin du cours