

## Manip. Elec.6 Etude des caractéristiques d'un transistor BJT

### E6.1 But de la manipulation

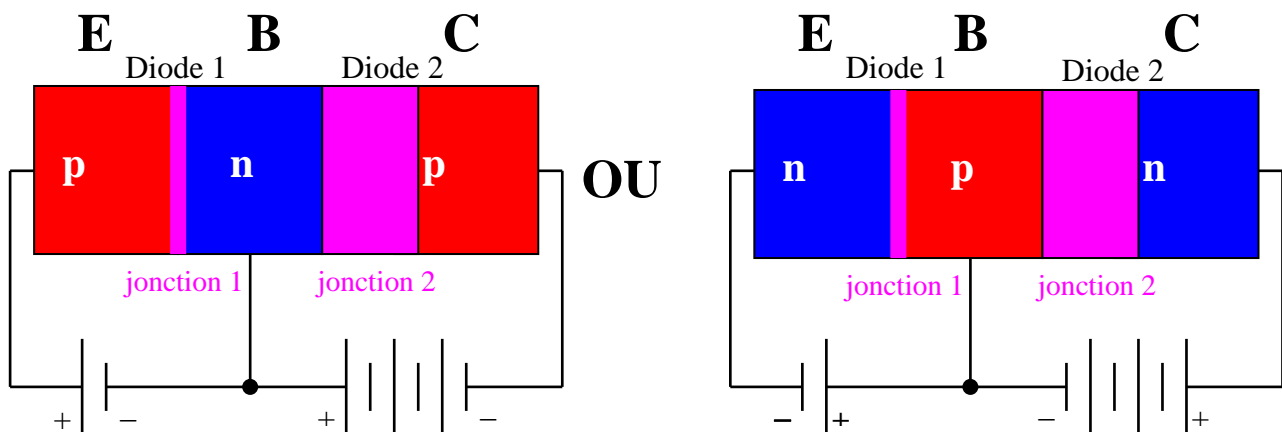
Le but de la manipulation est l'étude détaillée des caractéristiques électriques d'un transistor bipolaire à jonction.

### E6.2 Rappels théoriques

#### E6.2.1 Constitution – Polarisation en mode amplification

♦ **Constitution** : monocristal comprenant trois régions : deux régions p séparées par une région n ou 2 régions de type n séparées par une région p  $\Rightarrow$  **transistor p-n-p** ou **transistor n-p-n** : on y trouve deux diodes de telle sorte que la région n ou p soit commune aux deux diodes les trois lettres désignant la succession des trois types constituant le monocristal.

♦ **Nomenclature** : on appelle **base** la région commune p (ou n); on appelle **émetteur** la région n (ou p) de la diode 1, **collecteur** la région n (ou p) de la diode 2.



♦ **Polarisation** on polarise la jonction 1 dans le sens passant  $\Rightarrow$  la diode 1 présente une faible résistance au passage du courant.

& on polarise la jonction 2 dans le sens bloquant  $\Rightarrow$  les porteurs majoritaires désertent la jonction 2 dont l'épaisseur augmente. Seul le très faible courant de porteurs minoritaires circule dans la diode 2.

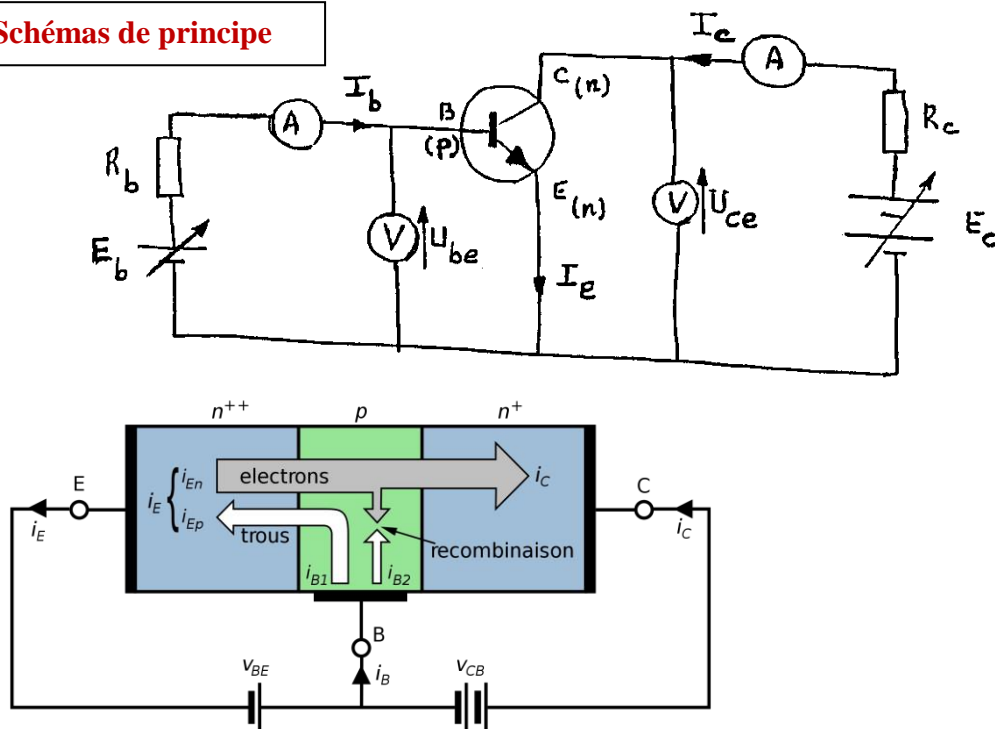
$\Rightarrow$  **Examinons le cas p-n-p** : la jonction 1 est passante (courant de trous); en ce qui concerne la jonction 2, si les tensions de polarisation sont suffisantes et si la concentration en impuretés dans la base n'est pas trop élevée (*en pratique, c'est le cas car la base est très mince par rapport au collecteur et à l'émetteur et la concentration en impuretés y est donc plus faible que celle de l'émetteur*), celle-ci contient peu d'électrons libres.  $\Rightarrow$  La plus grande partie des trous diffusant de l'émetteur vers la base **ne se recombinent pas** dans la jonction 1 avec les électrons venant de la base mais continuent leur mouvement vers le collecteur et y pénètrent, attirés par le champ électrique de la jonction 2. Ils s'y combinent avec des électrons fournis par la borne négative du générateur 2.  $\Rightarrow$  plus de 98 % des trous traversant la base ne s'y combinent pas avec des électrons et arrivent au collecteur.

$\Rightarrow$  Dans le **cas du transistor n-p-n**, la polarité des générateurs doit être inversée et le courant est électronique.

### E6.2.2 Propriété d'amplification de courants

♦ Soit un circuit comportant un **transistor n p n**, deux sources de tension continue  $E_b$  et  $E_c$  réglables, en série chacune avec une résistance limitant le courant, respectivement  $R_b$  et  $R_c$ . Le circuit comprend également un **microampèremètre** pour la mesure du **courant  $I_b$**  (courant de base), un **milliampèremètre** pour la mesure du **courant  $I_c$**  (courant de collecteur), deux voltmètres, pour la mesure des différences de potentiel  $U_{be}$  et  $U_{ce}$  respectivement. La polarité du générateur  $E_b$  est telle que la différence de potentiel  $U_{be}$  est positive (**jonction 1 émetteur-base polarisée dans le sens direct**). Les électrons provenant des deux sources de tension et se présentant à l'émetteur remontent donc facilement la barrière de potentiel réduite entre émetteur et base ; ensuite, la plupart de ces électrons franchissent la **jonction 2 collecteur-base (polarisée en sens inverse)** sous l'effet accélérateur du potentiel imposé par la source de tension  $E_c$  ; les autres électrons quittent le transistor par la base. En d'autres termes, le courant  $I_b$  est très petit comparé au courant  $I_c$  et au courant  $I_e = I_b + I_c$

#### Schémas de principe



♦ On pose généralement :  $I_c = \alpha I_e \quad \Rightarrow \quad I_b = (1 - \alpha) I_e$

le coefficient ALPHA, proche de l'unité, donnant la fraction des porteurs de charge injectés par l'émetteur dans la base qui sortent par le collecteur, et on pose :

$$I_c = \beta \cdot I_b$$

où  $\beta$  est le coefficient d'amplification ou gain en courant du transistor :

Typiquement  $\beta$  est de l'ordre de 10 à 1000 selon le transistor utilisé.

On vérifie que :  $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$

Exemples : pour  $\alpha = 95 \%$ , on a  $\beta = 19$

98 %                      49

99 %                      99.

♦  $\Rightarrow$  À une faible variation  $\Delta I_b$  du courant  $I_b$  correspond une variation importante  $\Delta I_c$  du courant  $I_c$  ; c'est l'effet physique mis en oeuvre dans un transistor utilisé comme amplificateur.

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}$$

### E6.2.3 Relations et caractéristiques du transistor

$$I_E = I_B + I_C$$

$$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B \quad \text{avec } \beta \text{ le gain du transistor.}$$

Plus précisément, à cause du (petit) courant des porteurs minoritaires, on a :  $I_C = \beta \cdot I_B + I_{C0}$

♦ Le fonctionnement du transistor est caractérisé par des **courbes caractéristiques** :

- **réseau d'entrée** : constitué par les courbes de  $I_b$  en fonction de  $U_{be}$  à  $U_{ce}$  fixé; en pratique ces courbes dépendent peu de  $U_{ce}$  et présentent l'allure d'une courbe caractéristique de diode polarisée dans le sens direct ou passant.

**Jonction E-B (polarisée en sens direct) : caractéristique courant – tension ou courbe  $I_b = f(U_{BE})$  avec paramètre  $U_{CE}$ .** On observera l'allure d'une courbe "diode" polarisée en sens passant :  $I_b$  nul jusqu'au seuil ( $U_{seuil} \approx 0,7V$  typique du silicium), coude, puis  $I_b$  augmente linéairement avec  $U$  (comme une "résistance"  $R \Rightarrow$  comportement ohmique  $U=RI$ ).

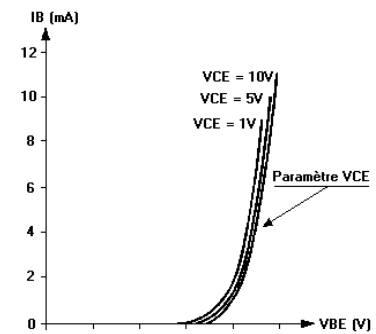
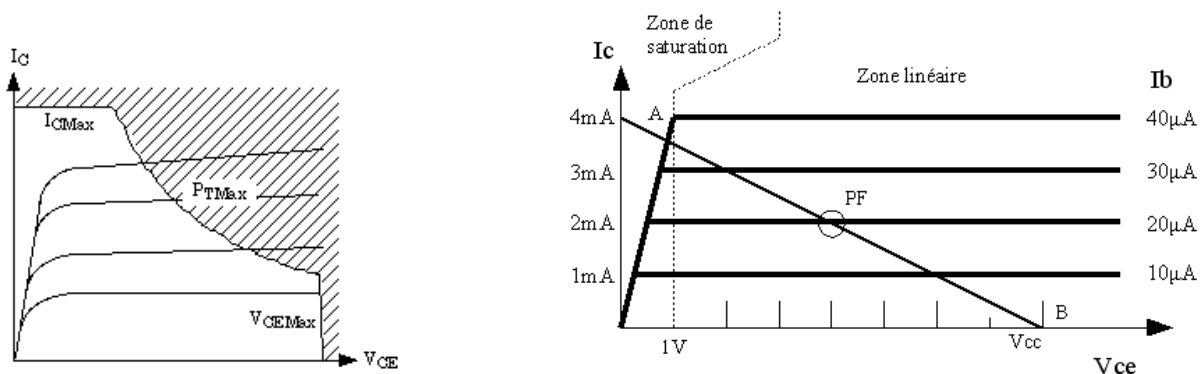


Fig. 6. - Réseau de caractéristiques d'entrée du transistor (paramètre  $V_{CE}$ )

- **réseau de sortie** : constitué par les courbes de  $I_c$  en fonction de  $U_{ce}$  à  $I_b$  fixé ; ces caractéristiques présentent une montée rapide suivie, après un coude, d'une montée lente et approximativement linéaire et enfin d'une montée à nouveau rapide et à ne pas prolonger pour la survie du transistor

**Jonction B-C (polarisée en sens inverse ou bloquant) : caractéristique courant – tension ou courbe  $I_c = f(U_{CE})$  avec paramètre  $I_b$ .** Ici la valeur du paramètre  $I_b$  influence fortement le fonctionnement du transistor. Deux régimes observés : ❶ aux faibles valeurs  $U_{CE}$  : comportement ohmique, coude, puis ❷ aux valeurs  $U_{CE}$  plus élevées :  $I_c$  quasi constant quelle que soit la valeur de  $I_b$ .



- amplification en courant : pour une valeur de  $U_{ce}$  donnée, le **courant de collecteur**  $I_c$  est égal au **courant de base**  $I_b$  multiplié par le facteur d'amplification du transistor appelé gain en courant ou  $\beta$  :  $I_c = \beta I_b$  ; le transistor fonctionne en amplification, ce que l'on recherche dans les amplificateurs.

**Transfert - Amplification en courant du quadripôle transistor : courbe  $I_c = f(I_b)$  avec paramètre  $U_{ce}$ .** La partie linéaire permet de calculer le gain du transistor noté  $\beta$  (pente de la droite).  $\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}$

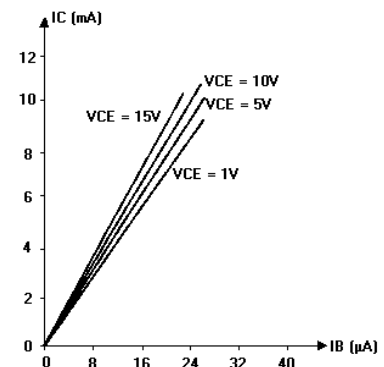
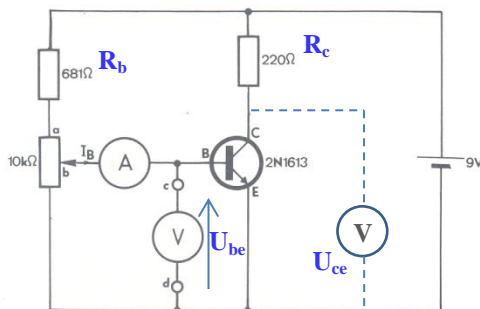


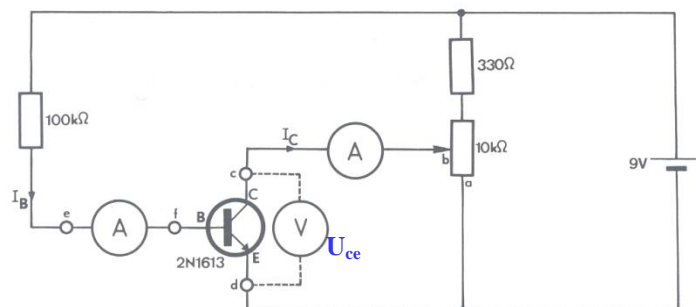
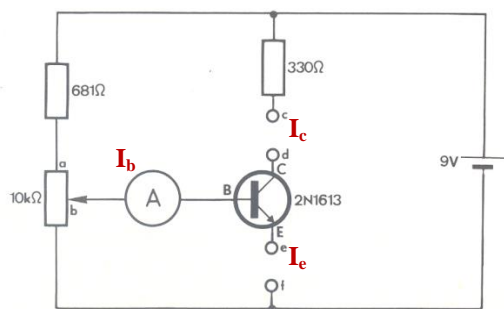
Fig. 7 - Réseau des caractéristiques de transfert relatif au couple  $I_B$  et  $I_C$  (paramètre  $V_{CE}$ ).

♦ Les différentes courbes caractéristiques se relèvent au moyen de circuits appropriés (fig. ci-dessous). Dans ces circuits, une seule source de tension continue est utilisée (9V) ; le montage en émetteur commun a été choisi (*le plus utilisé pour l'amplification de tensions variables*) ; un diviseur de tension résistif (résistances  $R_b$ ,  $R_c$ ) assure la polarisation des jonctions. Un potentiomètre permet de régler, selon le cas, la valeur du courant de base  $I_b$  ou la valeur du courant de collecteur  $I_c$ .



#### Montages pour les mesures :

1. **Caractéristique d'entrée** :  $I_b = f(U_{be})$   
pour  $U_{ce}$  fixé
2. **Transfert en courant** :  $I_c = \beta I_b$  et  
vérification de la relation :  $I_e = I_c + I_b$
3. **Caractéristique de sortie** :  $I_c = f(U_{ce})$   
pour un  $I_b$  donné

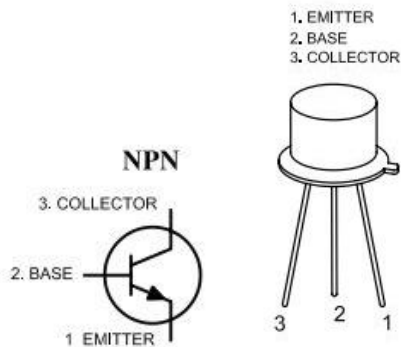


## E6.3 Dispositif expérimental

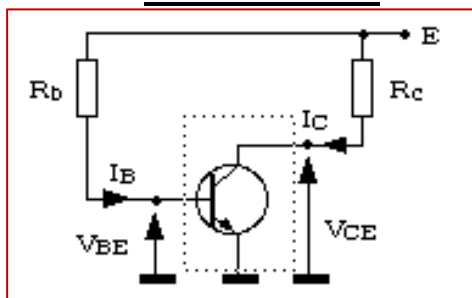
### ♦ Transistor étudié

⇒ transistor bipolaire à jonction (BJT), modèle **2N1711**

Vous pouvez accéder à des données concernant ce transistor en consultant des *datasheet*. Quelques "datasheets" sont données en documents complémentaires sur MOODLE.



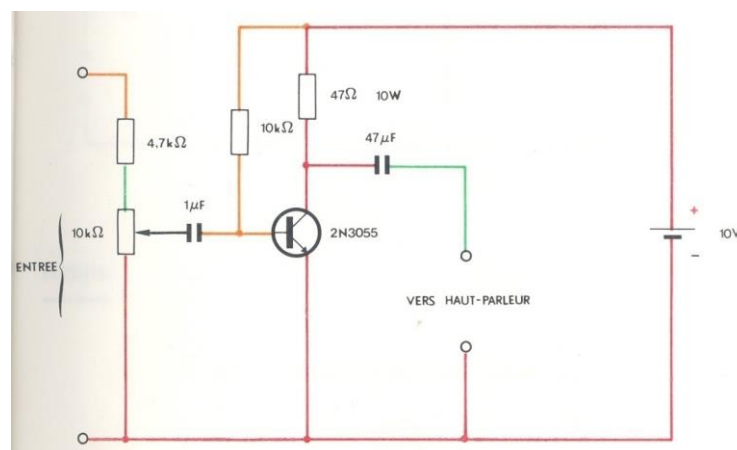
♦ Polarisation du Transistor : montage en émetteur commun. L'émetteur est à la masse et les résistances  $R_b$  et  $R_c$  sont à choisir pour définir la polarisation, suivant l'étude à effectuer. On utilise une source de tension continue (0-30V) que l'on fixe à  $E = 9V$ .



♦ Prise de mesures: la plupart des mesures de courant ou de différence de potentiel s'effectueront au moyen des multimètres digitaux.

⚠ **ATTENTION** : pour les mesures des "petits" courants, utilisez un **microampèremètre à aiguille** ou un **multimètre digital ITC 921 (coque orange)**

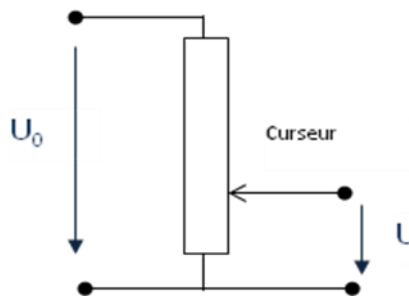
Pour tester le principe d'amplification des signaux alternatifs, on utilisera également un générateur de signaux pour générer le signal d'entrée et un oscilloscope pour mesurer les signaux d'entrée et de sortie.



## E6.4 Manipulation

### E6.4.1 Préambule : utilisation d'un potentiomètre

#### Rappel du principe



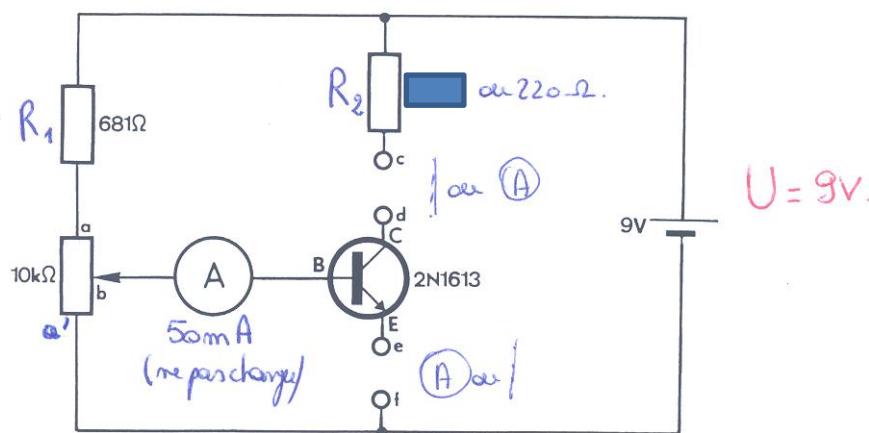
$$U = U_0 \frac{R_{\text{entre C et B}}}{R_{\text{tot}}}$$

Le curseur s'utilise ici à l'aide d'un petit tournevis.

Alimenter le potentiomètre "10kΩ" et lire U au multimètre (ohmmètre) tout en actionnant le curseur (tournevis).

### E6.4.2 Vérification de la relation liant les trois courants

Sur une plaquette *breadboard* : monter le circuit suivant.



En faisant varier le potentiomètre, relever (au moins trois) plusieurs points ( $I_b$ ,  $I_c$ ,  $I_e$ ) afin de vérifier la relation :  $I_e = I_b + I_c$ .

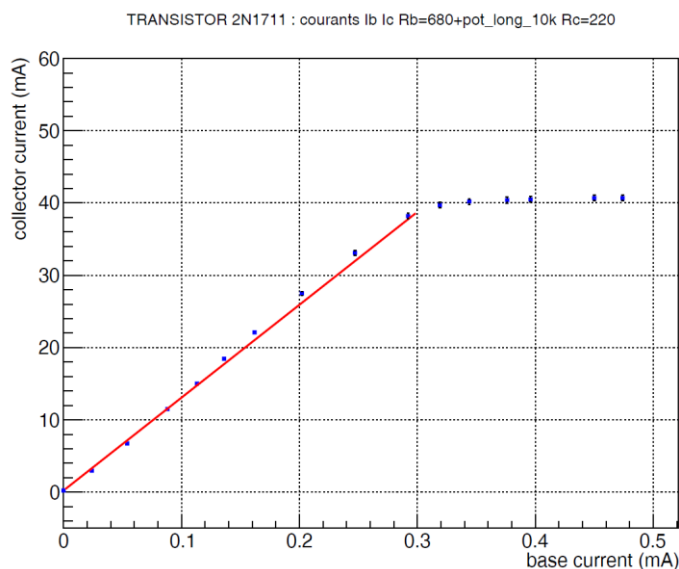
### E6.4.3 Etude de la variation $I_C = f(I_B)$ et gain en courant $I_C = \beta I_B$

Au moyen du même circuit, relever plusieurs points ( $I_B$ ,  $I_C$ ) afin d'étudier la variation de  $I_B$  en fonction de  $I_C$  et de déterminer le facteur d'amplification ou gain en courant du transistor.

Courant de Base $I_B$ ( A )	Courant de collecteur $I_C$ ( A )

✎ Tracer un graphique  $I_C = f(I_B)$  et déterminer le gain en courant du transistor comme pente de la droite (partie linéaire du graphique).

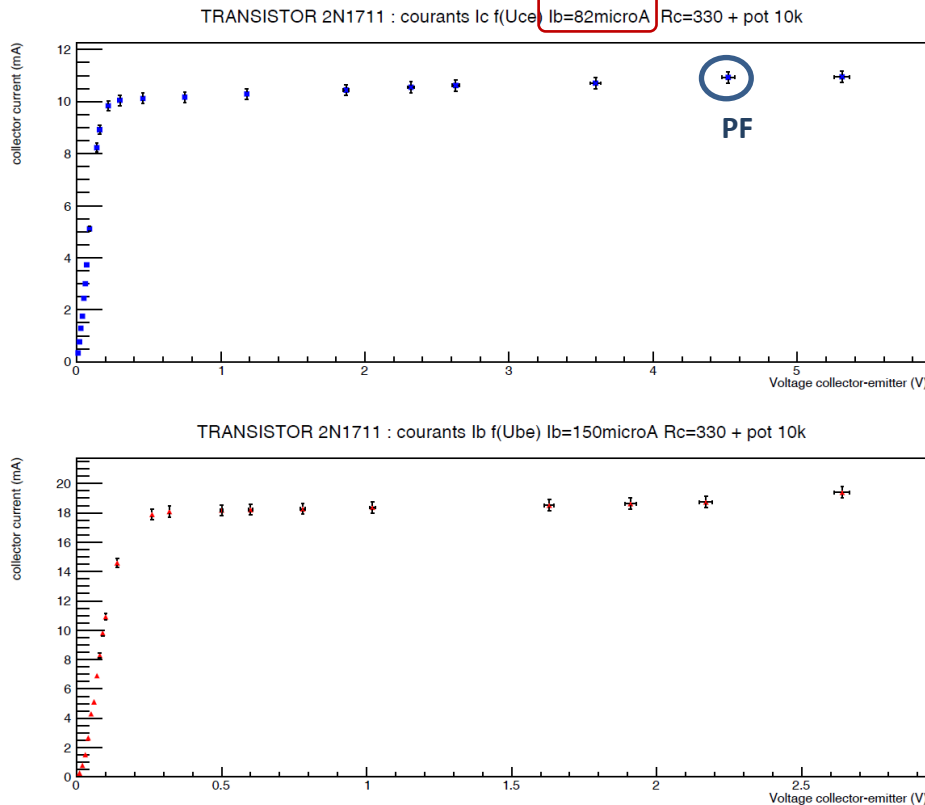
- Pour comparaison, nos résultats ....



- Pour comparaison, mesurer également le gain en courant au moyen d'un multimètre en utilisant la borne multifonctionnelle (*multi-function socket*):  $h_{FE} = \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ .

### E6.4.4 Caractéristiques d'entrée et de sortie : droite de charge et point de fonctionnement

Les courbes caractéristiques d'entrée et de sortie ont été mesurées au moyen des montages 1 et 3 schématisés en page E6-4.



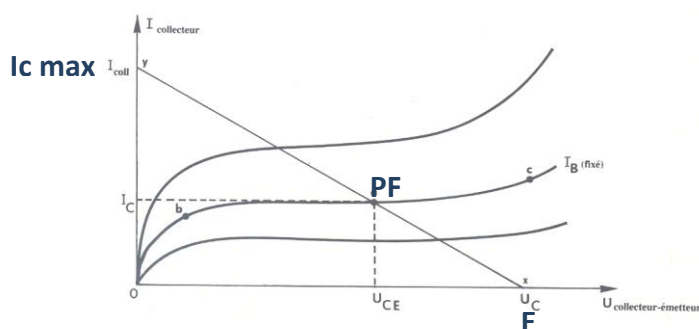
Ces courbes permettent de déterminer le point de fonctionnement et donc la droite de charge du transistor étudié. Soit "PF" le point de fonctionnement choisi sur une des courbes  $I_c = f(U_{ce})$ : il correspond à un certain courant de base  $I_b$ . Dans notre cas, fixons le PF (entouré) correspondant à  $I_b = 80 \mu\text{A}$ . Les coordonnées de ce point sont donc :  $(U_{ce}, I_c) = (4,5 \text{ V}, 11 \text{ mA})$ .

La droite de charge passera par le PF et le point d'abscisse  $U = 9 \text{ V}$  (tension d'alimentation du générateur) et coupera l'axe des ordonnées en un point  $I_{c\text{max}}$ . Sa pente permettra alors de déterminer

$$R_c \text{ via la relation : } R_c = \frac{9}{I_{c\text{max}}}$$

$$\text{On peut aussi utiliser la formule : } R_c = \frac{E - U_{ce\text{PF}}}{I_{c\text{PF}}}, \text{ soit dans notre cas : } R_c = \frac{9 - 4,5}{11 \cdot 10^{-3}} = 409 \Omega$$

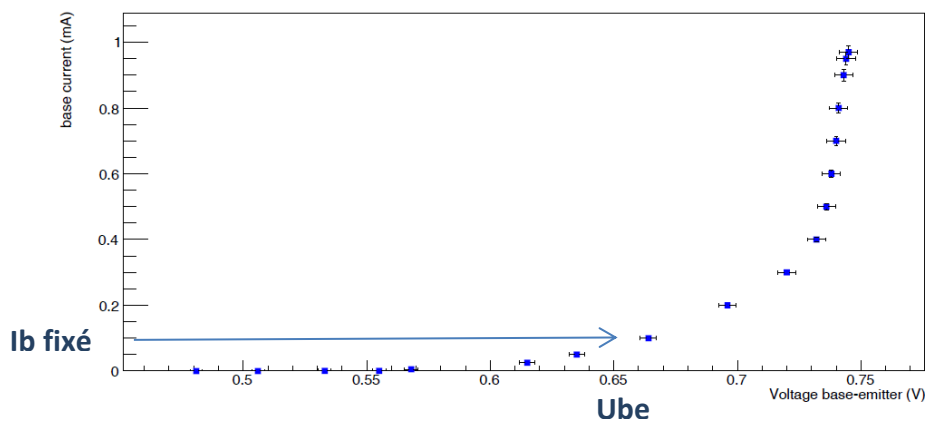
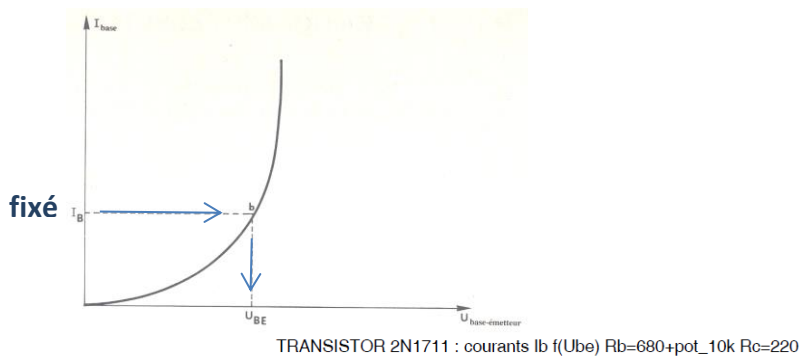
On choisira donc une valeur de résistance  $R_c$  au moins égale à  $410 \Omega$ .





D'autre part, on détermine la valeur de  $R_b$  comme suit :  $R_b = \frac{E - U_{be}}{I_{b \text{ fixé}}}$  soit dans notre cas :

$$R_b = \frac{9 - 0,65}{82 \cdot 10^{-6}} = 101 \cdot 10^3 \Omega \approx 100 \text{ k}\Omega$$



### E6.4.5 Utilisation du transistor en amplificateur (à 1 étage) : amplification de signaux alternatifs sinusoïdaux

Le principe de l'expérience est rappelé sur le schéma ci-dessous.

