

Manip. Elec.5 Semi-conducteurs, diodes et transistors BJT

E5.1 But de la manipulation

Le but de la manipulation est l'étude des caractéristiques électriques d'une diode à semi-conducteur, d'une diode Zener ainsi que d'un transistor bipolaire à jonctions.

E5.2 Semi-conducteurs

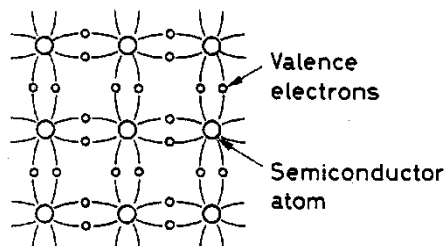
E5.2.1 Cristaux de Ge ou Si purs

♦ Rappelons que la distinction entre un matériau conducteur et isolant se base sur la résistivité électrique ρ :

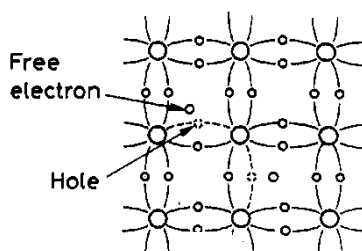
Conducteur (métal)	semi-conducteur	matériau isolant(ou diélectrique)
$\rho < 10^{-5} \Omega.m$	$10^{-5} < \rho < 10^7 \Omega.m$	$\rho > 10^7 \Omega.m$

⇒ Les semi-conducteurs ont une résistivité intermédiaire entre celle des isolants et celle des conducteurs. Les plus connus sont le germanium (Ge) et le silicium (Si) qui sont les constituants de base des diodes à cristal, des transistors et des circuits intégrés.

♦ Les atomes de Ge et Si possèdent 4 électrons de valence. Dans un cristal, ils se lient en mettant en commun leurs électrons de valence comme schématisé ci-dessous:



♦ A la température ambiante, il peut se faire qu'un électron possédant assez d'énergie quitte sa place ⇒ l'électron est libre de se mouvoir et sa place devenue libre est appelée trou ("hole" en anglais) comme schématisé ci-dessous :



La place libre (le trou) peut être prise par un électron provenant d'une autre paire (liaison covalente) : un trou peut ainsi se déplacer dans le cristal (**courant de trous**).

♦ ⇒ dans un cristal à la température ambiante, un courant électrique peut naître : à la fois mouvement d'électrons et mouvement de trous. Le nombre d'électrons libres et de trous est constant pour une température donnée et croît avec elle. La conductivité du cristal augmentera donc avec la température. Cependant, à la température ambiante, la conductivité d'un cristal semi-conducteur "pur" reste faible car la probabilité de recombinaison électron-trou est grande. ⇒ Pour augmenter la conductivité, il faudrait pouvoir augmenter soit le nombre d'électrons, soit le nombre de trous. On y arrive en injectant des "impuretés" dans le cristal de semi-conducteur pur.

Remarque importante : le trou ne peut exister que dans un semi-conducteur. Il n'y a pas de trous dans les conducteurs. Soumis à l'action d'un champ électrique, le trou se déplace vers l'électrode négative tandis

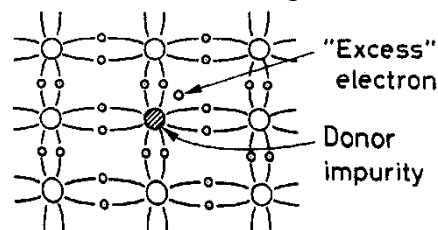
que l'électron se déplace vers l'électrode positive. Le trou possède donc toutes les caractéristiques d'une charge positive libre, alors qu'elle n'est en fait qu'une absence de charge négative.

E5.2.2 dopage \Rightarrow impuretés dans les cristaux

En remplaçant dans le réseau cristallin de Ge ou de Si certains atomes par des atomes d'autres corps appelés impuretés, on arrive à modifier sensiblement les caractéristiques électriques du cristal. La concentration en impuretés est, en pratique, d'environ un atome d'impureté par million d'atomes de Ge. Deux types d'impuretés peuvent être introduites.

1/ **Impuretés donneurs d'électrons** \Rightarrow **semi-conducteur dopé n**

♦ Les donneurs sont des corps dont les atomes possèdent **cinq électrons de valence** tels l'arsenic, le phosphore et l'antimoine. \Rightarrow Si on remplace dans le cristal de Ge pur, un atome de Ge par un atome donneur, un des cinq électrons de valence n'a pu trouver place dans une paire d'électrons : il y a un électron en excès donné par l'atome d'impureté.



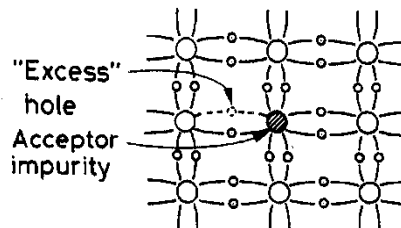
À la température ambiante, tous les atomes d'impureté ont perdu leur cinquième électron de valence ; ceux-ci ont brisé leurs attaches et se meuvent librement dans le cristal.

\Rightarrow L'atome donneur, électriquement neutre à l'origine, possède maintenant une charge élémentaire positive en excès ; il est devenu un **ion positif, dans le cristal**.

► Un **cristal de Ge** contenant des atomes donneurs est dit **de type n** (négatif); il possède des ions positifs fixes et des électrons libres.

2/ **Impuretés accepteurs d'électrons** \Rightarrow **semi-conducteur dopé p**

♦ Les accepteurs sont des corps dont les atomes ne comportent que **trois électrons de valence** tels l'indium, le bore et l'aluminium. \Rightarrow Si on remplace dans le cristal de Ge pur, un atome de Ge par un atome accepteur, une des paires d'électrons ne sera pas complète ; il manque un électron.



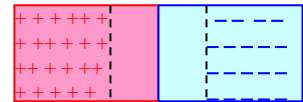
À la température ambiante, un électron de valence aura toujours acquis une énergie suffisante pour se libérer et venir occuper la place libre. Un trou est donc apparu dans le semiconducteur et l'atome accepteur possède un électron en excès.

\Rightarrow L'atome accepteur s'est ionisé. Il a "accepté" un électron et est devenu ainsi un **ion négatif**. Un trou est apparu dans un lien covalent. Ce trou peut se déplacer dans le cristal d'une liaison à une autre.

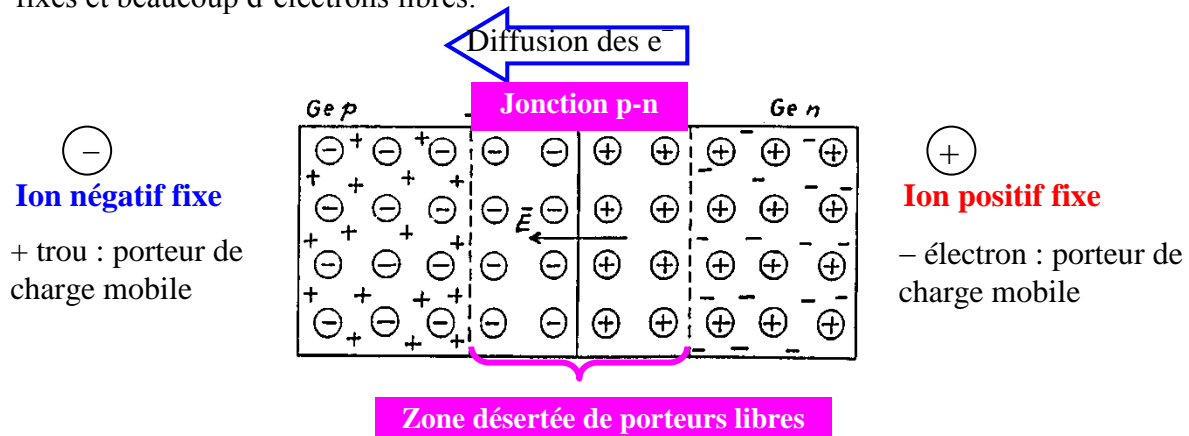
► Un **cristal de Ge** contenant des atomes accepteurs est dit du **type p** (positif) ; il possède des ions négatifs fixes et des trous libres.

E5.3 La jonction p-n

E5.3.1 La jonction non polarisée : différence de potentiel de contact



♦ Accolons⁽¹⁾ un cristal de semi-conducteur de type p et un cristal de type n. La surface de contact entre les deux cristaux s'appelle **jonction p-n**. Le semi-conducteur p, électriquement neutre dans son ensemble, contient des ions négatifs fixes et beaucoup de trous libres. Inversement, le semi-conducteur n, également électriquement neutre, contient des ions positifs fixes et beaucoup d'électrons libres.

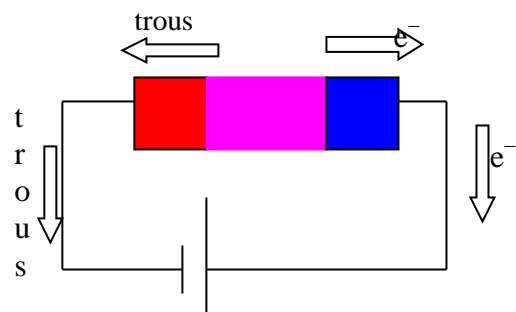
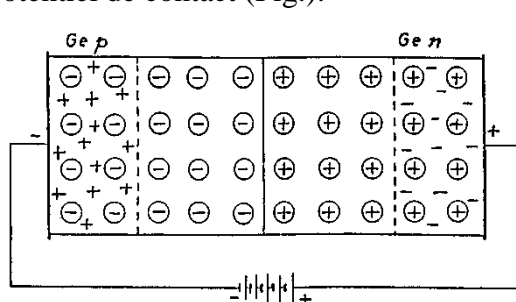


♦ Comme une variation soudaine de concentration en porteurs de charge libres à la jonction est physiquement impossible, des électrons vont diffuser vers la région p et des trous vont diffuser vers la région n. Au voisinage de la jonction, électrons et trous vont ainsi se neutraliser et chaque neutralisation implique la disparition d'un électron et d'un trou, disparition laissant des **charges positives fixes non équilibrées côté n et négatives côté p**. \Rightarrow Il apparaît, au voisinage de la jonction, une différence de potentiel de contact, et donc un champ électrique s'opposant petit à petit à la diffusion des charges mobiles.

La recombinaison de tous les électrons et de tous les trous du cristal est ainsi rendue impossible par ce potentiel de contact (\approx quelques dixièmes de volt, dépendant de la concentration en électrons et en trous).

E5.3.2 La jonction p-n polarisée en sens inverse ou sens bloquant

► On polarise le cristal p-n en appliquant une différence de potentiel extérieure telle que borne - du côté p et borne + du côté n c-à-d en appliquant une ddp de même sens que la différence de potentiel de contact (Fig.):



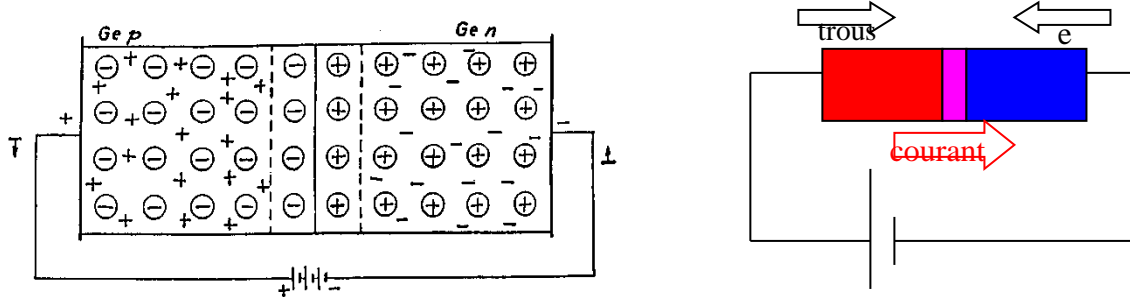
\Rightarrow se produit un mouvement d'électrons de la région n vers l'électrode positive et un mouvement de trous de la région p vers l'électrode négative provoquant un élargissement de la jonction et une augmentation de la barrière de potentiel. Pratiquement, **aucun courant** ne circule dans le cristal.

¹ il est bien évident qu'il est impossible d'accoler deux cristaux de telle sorte qu'ils n'en forment qu'un seul. En pratique, cependant, il existe des techniques de micro-électronique (telle que la diffusion d'ions) permettant de fabriquer une jonction p-n dans un monocristal.

NB Si la différence de potentiel appliquée est trop élevée, il y a destruction de la structure cristalline avec apparition d'un courant important.

E5.3.3 La jonction p – n polarisée en sens direct ou sens passant

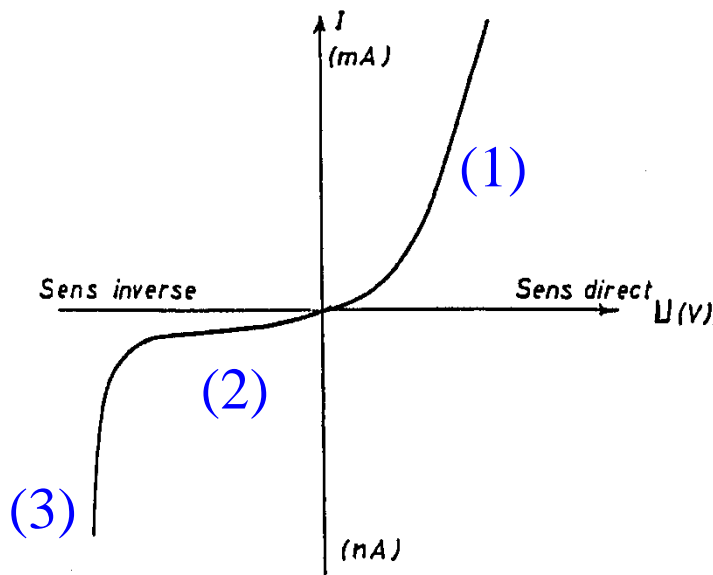
► On polarise le cristal p – n en appliquant une différence de potentiel telle que borne – du côté n et borne + du côté p (sens contraire de la différence de potentiel de contact) :



⇒ La densité en trous dans la région p augmente ainsi que la densité en électrons dans la région n. L'épaisseur de la jonction diminue. De plus, le champ électrique appliqué provoque un déplacement des porteurs (électrons ou trous) vers la jonction; et un **courant circule dans le circuit**. Ce courant est constitué par un déplacement d'électrons dans la région n et dans le circuit extérieur au cristal ainsi que par un déplacement de trous dans la région p.

E5.4 La diode à jonction p – n

E5.4.1 Courbe caractéristique $I = f(U)$



⇒ (1) Le courant dans le **sens passant** est relativement important et s'exprime en **mA**.

⇒ (2) Le courant dans le **sens bloquant**, quoique faible, n'est pas nul. Il s'exprime généralement en **nA**. Son existence s'explique par l'existence de porteurs parasites appelés porteurs minoritaires (trous dans la région n et électrons dans la région p). Leur nombre est petit vis-à-vis de celui des porteurs majoritaires (électrons dans la région n et trous dans la région p). Pour les porteurs minoritaires, la jonction est polarisée dans le sens direct et leur déplacement donne naissance au courant inverse.

⇒ (3) Quand la tension inverse est assez grande, il y a "claquage" de la diode. Le courant augmente fortement. Il est dû non pas à la présence de porteurs minoritaires mais à la destruction de la structure cristalline.

E5.4.2 Symbole

On représente généralement une diode (dite diode à pointe) par ce symbole :

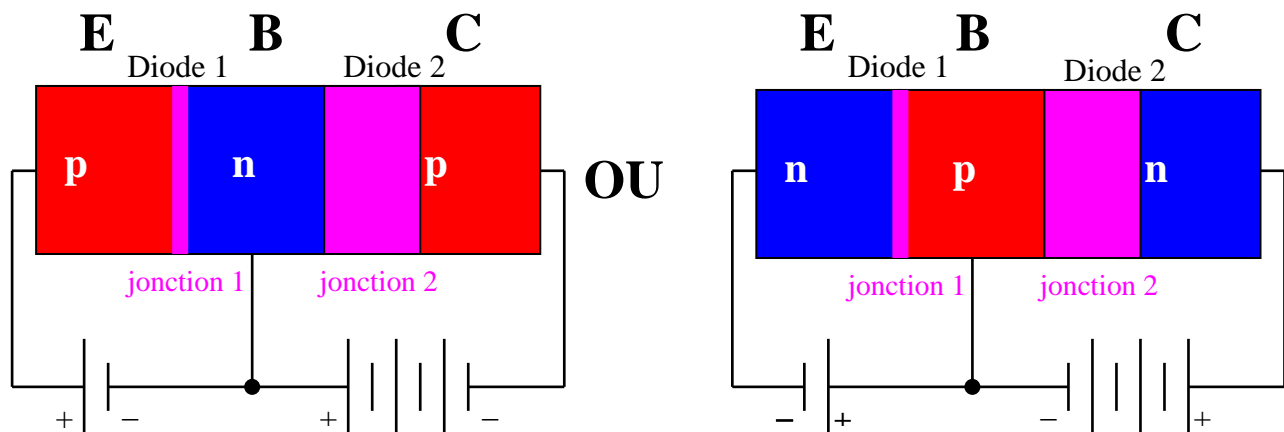


le sens de la flèche donnant le sens de passage du courant conventionnel.

E5.5 Le transistor bipolaire à jonction

♦ **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 p!n 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.

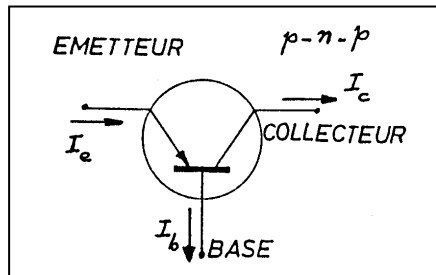
\Rightarrow **Examinons le cas p-n-p** : la jonction 1 est passante (courant de trous); en ce qui concerne la jonction 2, si les tensions de polarisation sont suffisantes et si la concentration en impuretés dans la base n'est pas trop élevée (*en pratique, c'est le cas car la base est très mince par 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.

◆ Représentation et convention

⇒ Transistor p-n-p

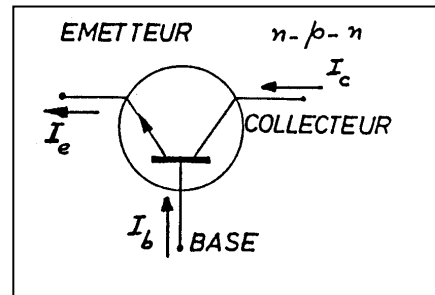
courant de trous dans le cristal



Dans le circuit extérieur : le courant d'émetteur est compté positivement s'il est entrant, les courants de base et de collecteur sont comptés positivement s'ils sont sortants. Dans le cristal, le courant est un déplacement de trous dans le sens de la flèche.

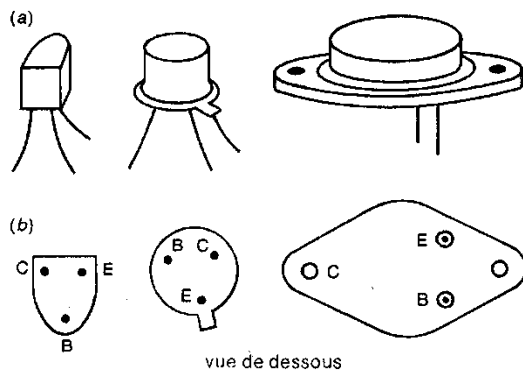
⇒ Transistor n-p-n

courant électronique dans le cristal

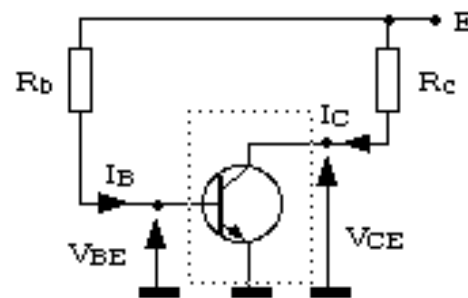


Dans le circuit extérieur : le courant d'émetteur est compté positivement s'il est sortant, les courants de base et de collecteur sont comptés positivement s'ils sont entrants. Dans le cristal, le courant est un déplacement d'électrons dans le sens opposé à celui de la flèche.

◆ Quelques modèles et exemple de polarisation en émetteur commun:



1. a) Trois modèles de transistors. b) Repérage des électrodes (vue de dessous).



◆ Relations entre courants et tensions du transistor :

$$I_E = I_B + I_C$$

$$U_C = U_E + U_{CE}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B \quad \text{Avec } \beta \text{ appelé gain du transistor.}$$

Plus précisément, à cause du courant des porteurs minoritaires, on a : $I_C = \beta \cdot I_B$

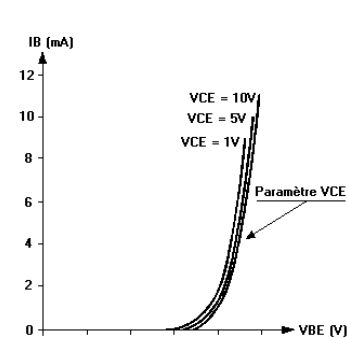


Fig. 6. - Réseau de caractéristiques d'entrée du transistor (paramètre VCE)

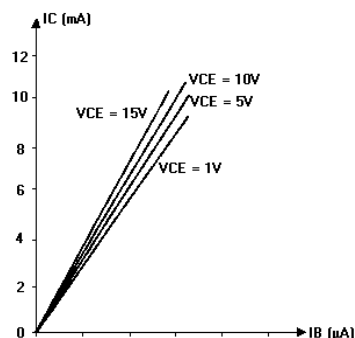
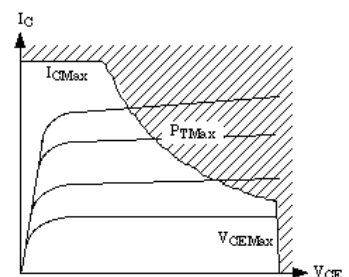


Fig. 7. - Réseau des caractéristiques de transfert relatif au couple IB et IC (paramètre VCE).



E5.3 Manipulation

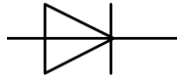
E5.3.1 Relevé de la courbe caractéristique $I = f(U)$ d'une diode à jonction

- ♦ Mesurer la résistance ohmique de la diode en utilisant la fonction prévue à cet effet au multimètre

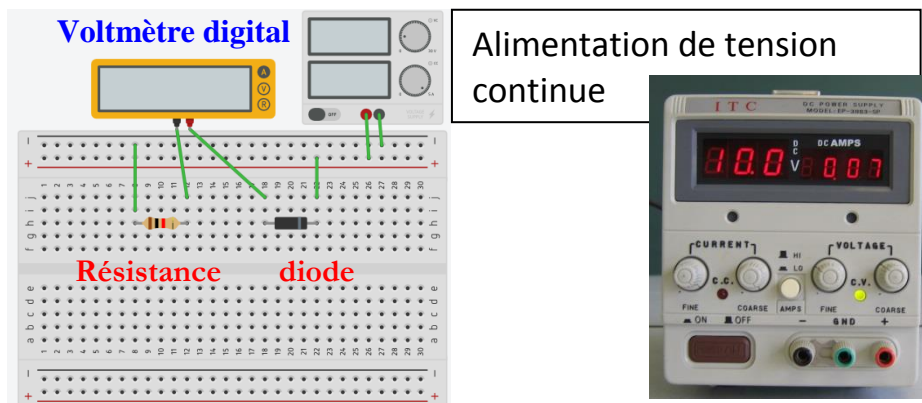
⇒ position "diode"

Sens direct ou passant :

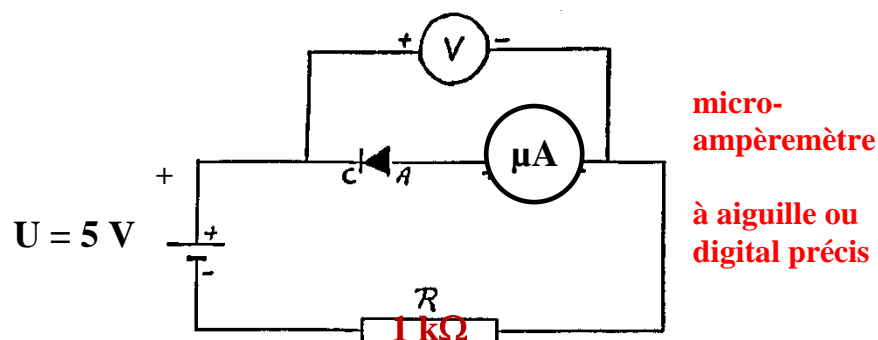
Sens inverse ou bloquant :



- ♦ La caractéristique de la diode à cristal semi-conducteur comprend **deux parties**. Un courant relativement important (mA à A) traverse la diode lorsque celle-ci est polarisée dans le sens direct (cathode négative, anode positive). Un très faible courant (μA à nA), à peine mesurable, traverse la diode lorsqu'elle est polarisée en sens inverse (cathode positive, anode négative).



- Réaliser le circuit "polarisation en sens bloquant ou sens inverse":

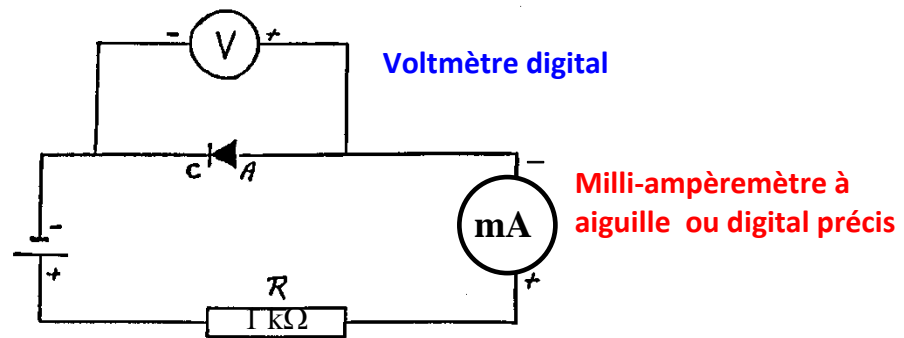


Vérifier que le courant inverse n'est pas mesurable au niveau " μA ".

MASTER

La résistance interne de la diode étant alors très grande, beaucoup plus grande que celle des ampèremètres dont on dispose, on connecte le voltmètre et le micro-ampèremètre comme indiqué sur la figure (configuration *long shunt*). Pourquoi? (cf. manip Elec.1 / BA1)

► Déconnecter puis réaliser le circuit "**polarisation en sens passant ou sens direct**"



La résistance interne de la diode est ici très petite vis-à-vis de celle du voltmètre.

MASTER

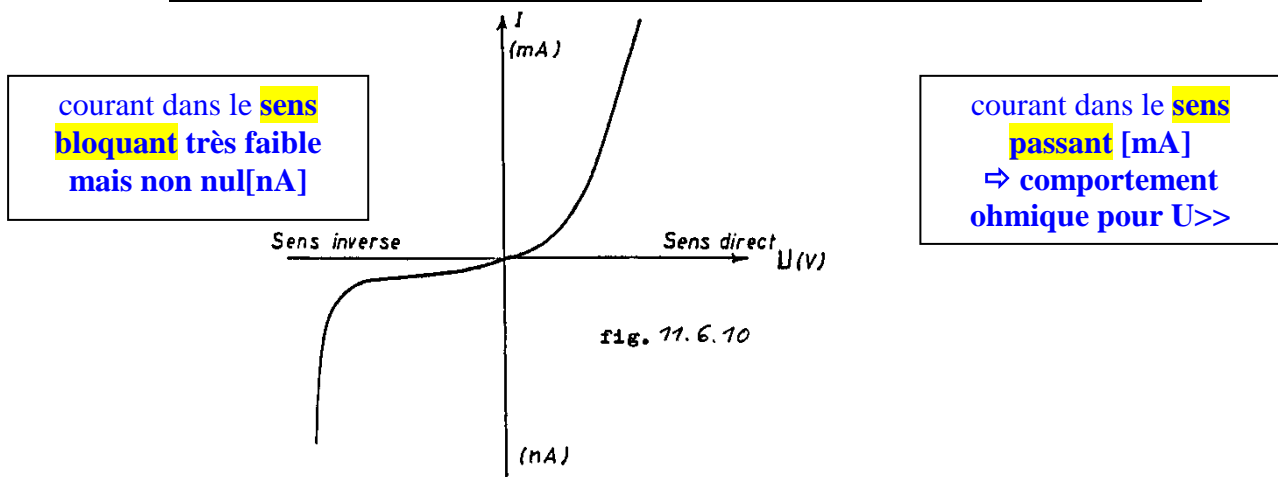
Expliquer la position du voltmètre et de l'ampèremètre (cf. manip Elec.O).

Relever (tableau 1) la seconde partie de la caractéristique (U et I positifs).

Tableau 1 Caractéristiques de la diode en sens passant			
U circuit (lue à l'alimentation)	U aux bornes de la diode	I traversant la diode	Calibre milli-ampèremètre
	0,50		
	0,55		
	0,60		
	0,65		
	0,70		
	0,75		
	0,80		
	0,85		

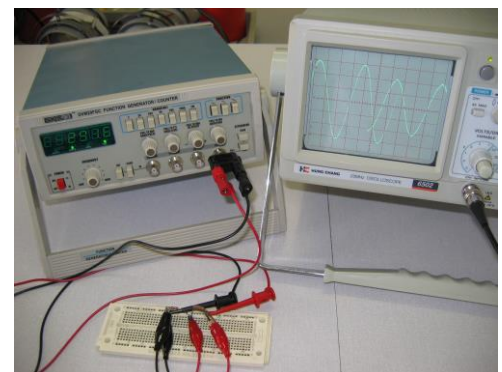
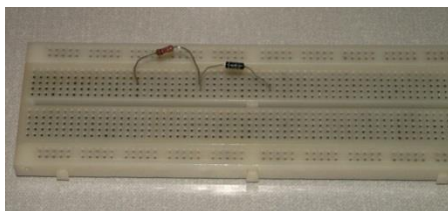
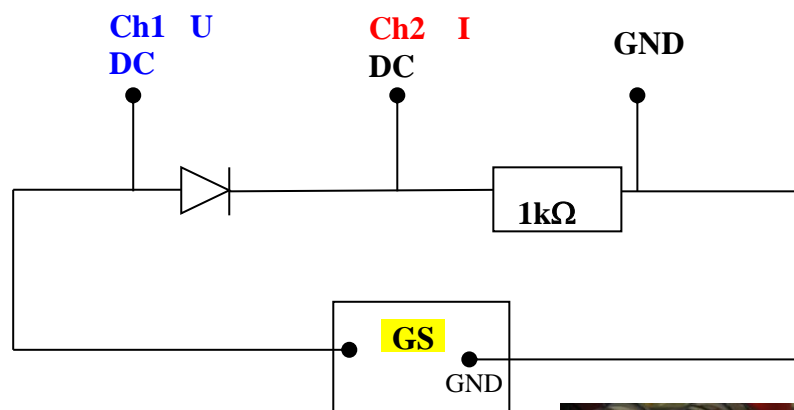
Portez les résultats en graphique et comparez à la figure de la page E5-4 et rappelée au point E5.3.2.

E5.3.2 diode à jonction p-n : observation de la courbe caractéristique



Pour visualiser les variations du courant I , on visualise les variations de la tension U_R aux bornes d'une résistance R placée en série dans le circuit. Cette tension est proportionnelle au courant I .
Pourquoi ?

⇒ Monter le schéma ci-dessous :



Les conditions pour le générateur de signaux (de tension) sont les suivantes : signal sinusoïdal fréquence : 200 - 500 Hz / amplitude : $\approx 1V$.

Commencer par visualiser les variations de tension et de courant en fonction du temps

- Qu'observez-vous à l'oscillo (mode DC) ? Re-schématiser et expliquer.

ATTENTION : courbe $I = f(t)$ pour U proche de 0 ! ⇒ tension seuil !!!

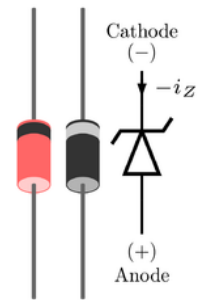
Vous allez maintenant observer directement la courbe caractéristique $I = f(U)$ de la diode en utilisant l'oscilloscope en mode Lissajous ou mode XY (bouton UTIL ⇒ menu).

- Même question.

ATTENTION : remarquer la tension seuil.

E5.3.3 diode Zener : observations à l'oscilloscope

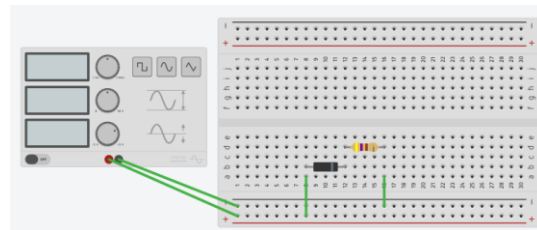
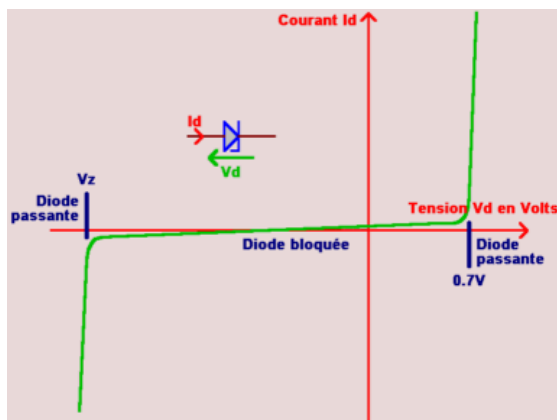
- ♦ Mesurer la résistance ohmique de la diode Zener ($U_{Zener} = 5,1V$)
Sens passant : Sens bloquant :



- ♦ Réaliser le même circuit que pour la diode à jonction avec visualisation de U aux bornes du circuit (U générateur) et du courant (U aux bornes de R) avec les conditions suivantes pour le générateur de signaux: signal sinusoïdal /fréquence ≈ 200 - 500 Hz

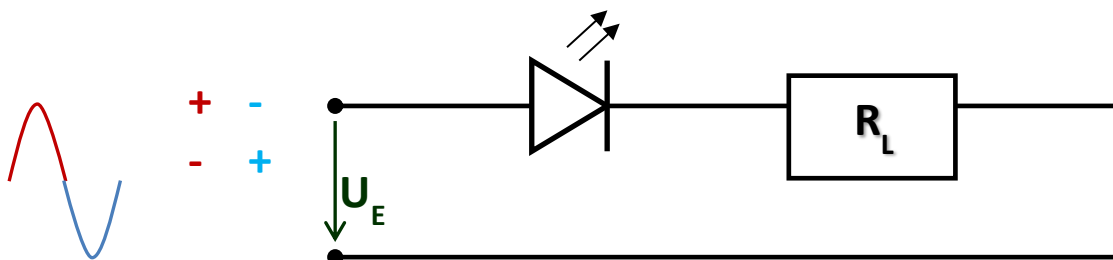
ICI faire varier l'amplitude : de $\approx 1V$ à $10V$ et observer l'évolution du courant sinusoïdal.

Passez en mode XY. Observez-vous la même courbe caractéristique que pour la diode à jonction ? La courbe observée ressemble-t-elle à celle prévue ci-dessous ?



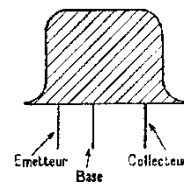
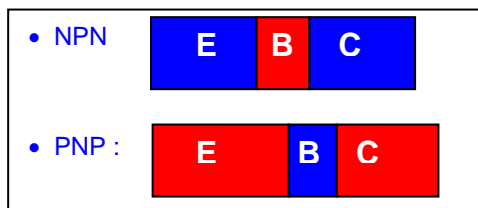
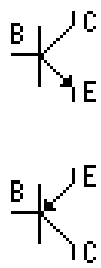
E5.3.4 diodes LED : observations à l'oscillo

- Réaliser un circuit à l'aide d'une LED (rouge, jaune ou verte) et d'une **résistance de $\approx 200 \Omega$** afin de visualiser U aux bornes du circuit (ou U générateur) et U aux bornes de R c-à-d le courant.
Diminuer la fréquence : de ≈ 200 Hz à quelques Hz. Observez les effets.

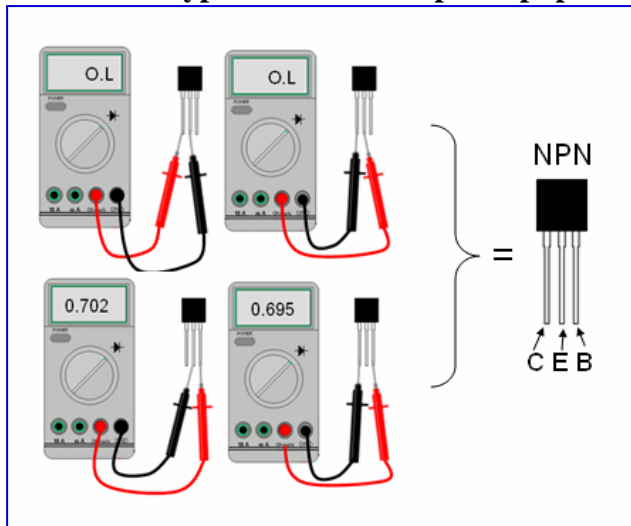


Qu'observez-vous à basse fréquence ($\leq 20Hz$) ?

E5.3.5 Etude qualitative d'un transistor bipolaire : 2 jonctions



Identifier le type de transistor npn ou pnp :



tester un **2N3546** et un **2N1711**
en utilisant un ohmmètre et en vous
inspirant du schéma ci-contre.

Identifiez-vous les jonctions pn ou np ?

MASTER Placer une lampe LED ??? (contenue dans bouton-poussoir => 24 V) en série avec l'alimentation continue afin de savoir si un courant passe ou pas, en suivant ce schéma :

Reliez alors les points C (collecteur), B (base) ou E (émetteur) au générateur de tension continue (+24V pour la lampe du bouton-poussoir) en suivant les indications du tableau et indiquez par un signe ✓ le résultat de vos observations.

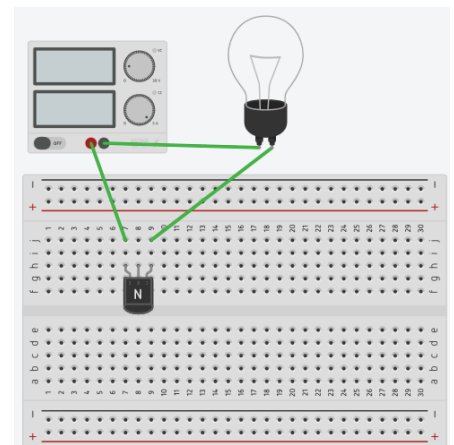


Tableau 2 Etude des jonctions d'un transistor									
Schéma	C	B	E	Pas de Courant		Faible courant		Courant	
1	+	−							
1	−	+							
1		+	−						
1		−	+						
2	+		−						
2	−		+						

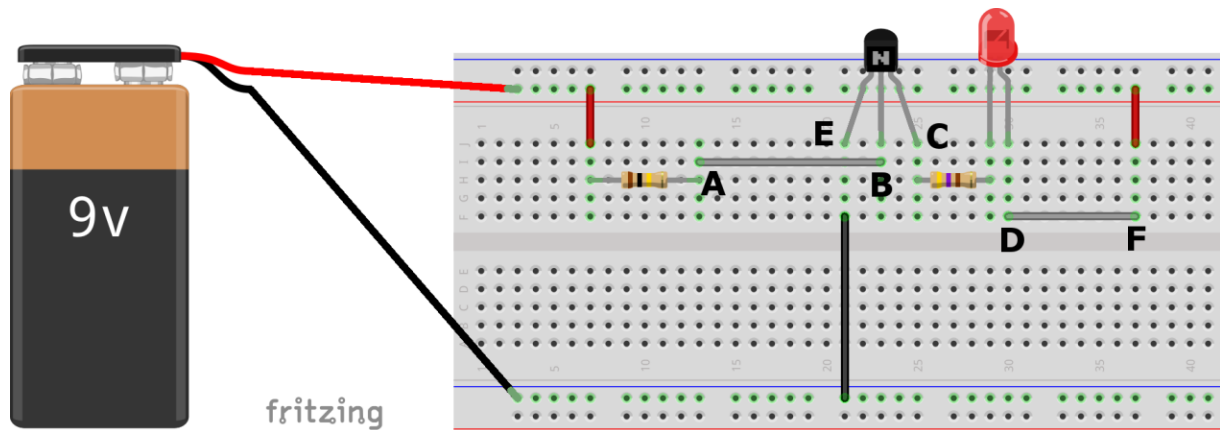
Expliquez brièvement. Conclure quant à la polarisation des jonctions EB et CB.

Une idée pour expliquer la différence de comportement C+ E- / C- E+ ?

E5.3.6 Mesures de tensions et courants

Utilisez ici le transistor 2N2222 (ou BC107) et une LED rouge.
Trouvez les résistances de $470\ \Omega$ et $100\ \text{k}\Omega$.

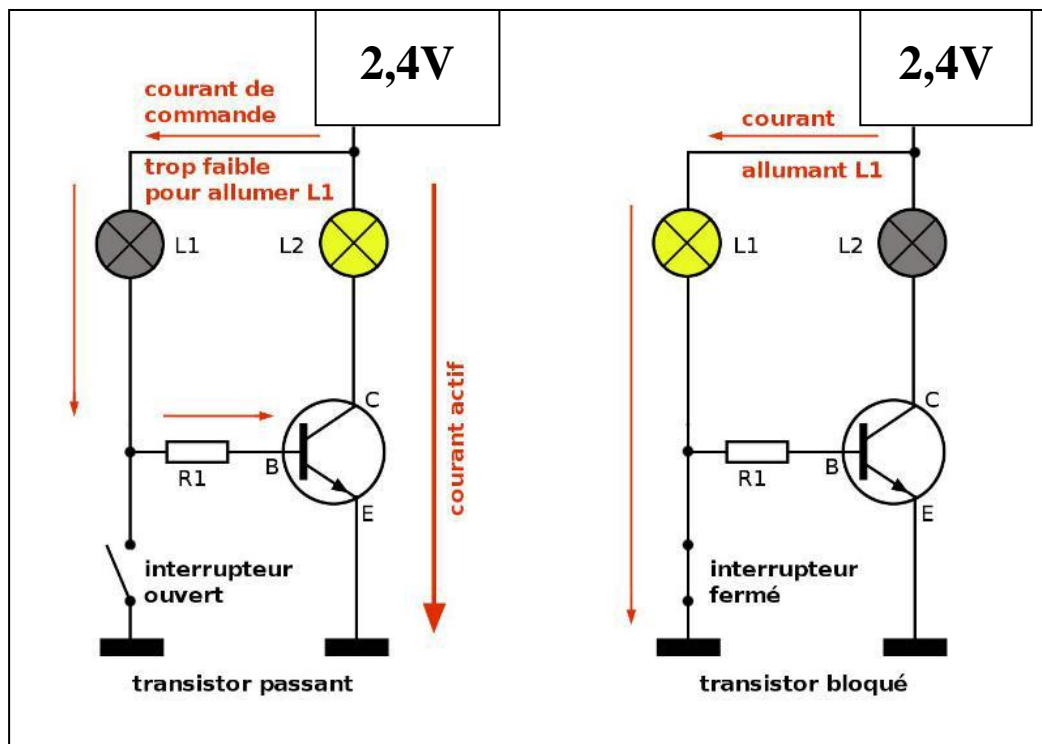
Réalisez le montage suivant :



ATTENTION : remplacez la pile par le générateur de tension continue réglé sur 0-9V.

- Mesurez la tension entre émetteur et base (entre E et B) :
- Mesurez la tension entre émetteur et collecteur (entre E et C) :
- Mesurez la tension entre émetteur et collecteur (entre B et C) :
- Vérifiez la relation attendue entre ces tensions.
- Enlevez le fil entre A et B et mettez votre pouce sur A et l'index sur B. La LED s'allume-t-elle encore ?
- Fil A-B enlevé, remplacez-le par un ampèremètre et mesurez le courant de base :
👉 **ATTENTION : utiliser un multimètre à aiguille ou digital ITC 921 (coque orange)**
- Remplacez le fil entre A et B. Enlevez le fil entre D et F ; remplacez-le par l'ampèremètre ? Quel courant mesurez-vous dans ce cas ? Quelle est sa valeur ?
- Déterminez le gain du transistor dans ces conditions.

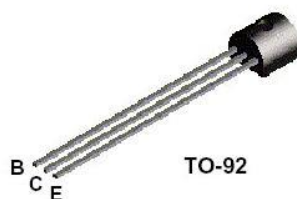
E5.3.7 Principe d'utilisation d'un transistor BJT (ouFET) comme switch ou interrupteur (ou commutation) .



Vérifiez le mode de fonctionnement "commutateur " ou "1 – 0" du transistor bipolaire.
Pour cela, choisir:

- un transistor de type 2N3704

2N3704



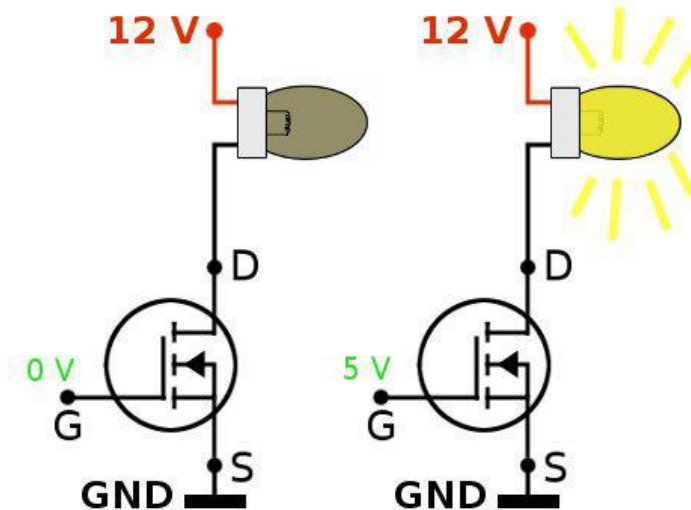
- une résistance **R1 = 12 kΩ**
- lampe **L1 = LED verte**
- lampe **L2 = LED rouge**
- fil de contact comme interrupteur

**Vous allez utiliser une alimentation 0-30 V.
Attention : ne pas dépasser 2,5 V !!!!!**

MASTER MOSFET

Utilisez ici le transistor XXXXXX et une "grande" LED rouge

Réalisez les montages ci-dessous et vérifiez l'allumage de la LED.



La figure montre un schéma où un **MOSFET canal N** est utilisé pour commander une charge (ampoule électrique, relais, moteur) alimentée en 12 V. Il s'agit ici d'un MOSFET à enrichissement, équivalent à un interrupteur normalement ouvert. Pour le fermer, il faut une tension sur la grille. Si la tension sur la grille est de 0 V, le transistor est bloqué, l'ampoule éteinte. Si la tension sur la grille est de 5 V, le transistor est déclenché, l'ampoule est allumée. La tension sur la grille doit être inférieure à 15 V pour ne pas détruire le transistor. La tension d'alimentation du montage doit être inférieure à ce que peut supporter le transistor (par exemple 60 V pour un IRFZ44).

Comparez la valeur de gain obtenue à la valeur fournie par un multimètre en position " h_{FE} ".