

Rapport de laboratoire

Ecole supérieure

Électronique

Salle R112

Transistors

Réalisé par :

Loïc Marmy
Mathéo Bonny

A l'attention de :

Phillipe Bovey
Juan José Moreno

Dates :

Début du laboratoire : 06 octobre 2025

Fin du laboratoire : 10 novembre 2025

Table des matières

1	Introduction.....	2
2	Conception et dimensionnement.....	2
2.1	Dimensionnement.....	2
3	Simulation.....	4
3.1	Objectifs.....	4
3.2	Schéma de simulation.....	4
3.3	Méthode de simulation.....	4
3.4	Résultat de simulation.....	5
3.4.1	Simulation pour 12V, résistances calculées	5
3.4.2	Simulation pour 12V, résistances ajustées	5
3.4.3	Simulation pour 13V, résistances calculées	5
3.4.4	Simulation pour 13V, résistances ajustées	5
3.5	Analyse	6
4	Mesures	7
4.1	Objectif.....	7
4.2	Schéma de mesure	7
4.3	Méthode de mesure	7
4.4	Résultat de mesure $G1 = 13V$	8
4.5	Résultat de mesure $G1 = 12V$	9
4.6	Comparaison avec la simulation.....	10
5	Conclusion	10
6	Annexes	11
6.1	Calcul de $R1$ et $R2$	11
6.2	Mesure du gain H_{fe}	12
6.3	Matériel utilisé.....	12

1 Introduction

L'objectif principal de ce TP est de comprendre, concevoir, simuler et caractériser le montage d'un transistor en émetteur suiveur. Il faudra maîtriser le fonctionnement et les spécificités de ce montage ainsi qu'appliquer des notions mathématiques (résolution de systèmes d'équations) pour le dimensionnement théorique des composants se trouvant dans le montage.

2 Conception et dimensionnement

2.1 Dimensionnement

Sur l'image de gauche se trouve le schéma du montage émetteur suiveur attaqué par un pont résistif. Sur l'image de droite c'est l'équivalent de Thévenin car il est nécessaire de trouver une équation qui nous permettra de calculer R1 et R2. Le théorème des mailles et des nœuds est appliqué au schéma équivalent de Thévenin afin d'en déduire une équation qui sera utilisée par la suite.

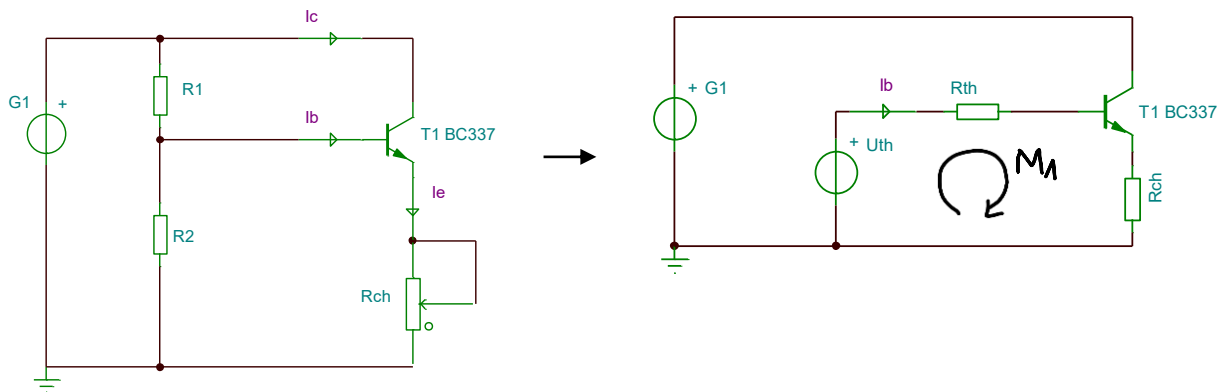


Figure 2.1.1 – Schéma de principe

Dans le schéma équivalent de Thévenin on a :

$$U_{th} = G1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_{th} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_{Rth} = R_{th} \cdot I_b \rightarrow I_b = \frac{I_e}{(\beta + 1)}$$

$$M1 = U_{th} - U_{Rth} - U_{be} - U_{Rch} = 0$$

On remplace maintenant par les valeurs :

$$\text{Mise en évidence de } \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \left(G1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) - \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{I_e}{(\beta + 1)} \right) - U_{be} - U_{Rch} = 0$$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \left(G1 - \frac{R_1 \cdot I_e}{(\beta + 1)} \right) - U_{be} - U_{Rch} = 0$$

Un rapport fixe est donc obtenu qui est :

$$\frac{U_{be} + U_{Rch}}{G1 - \frac{R_1 \cdot I_e}{(\beta + 1)}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Le rapport trouvé précédemment permet de calculer R1 et R2.

Selon la datasheet, le β_{\min} du transistor BC337-25 est de 160

DC Current Gain ($I_C = 100 \text{ mA}$, $V_{CE} = 1.0 \text{ V}$)	BC337	h_{FE}	100	–	630	–
	BC337-25		160	–	400	
	BC337-40		250	–	630	
			60	–	–	
Base-Emitter On Voltage ($I_C = 300 \text{ mA}$, $V_{CE} = 1.0 \text{ V}$)		$V_{BE(on)}$	–	–	1.2	Vdc
Collector-Emitter Saturation Voltage ($I_C = 500 \text{ mA}$, $I_B = 50 \text{ mA}$)		$V_{CE(sat)}$	–	–	0.7	Vdc

Figure 2.1.2 – Valeur de hfe selon la datasheet du BC337-25

La valeur de Vbe a été simulée avec le montage suivant :

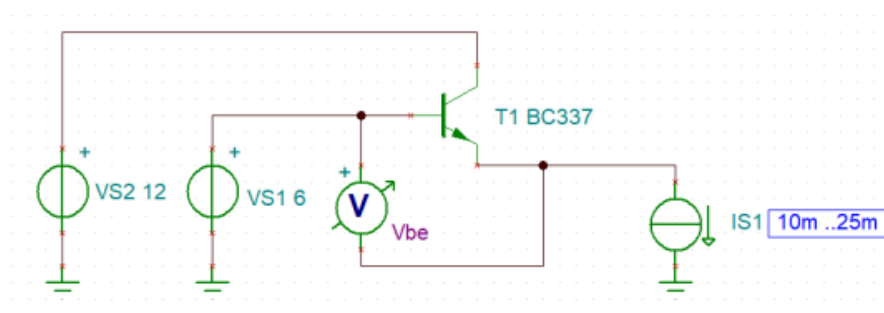


Figure 2.1.3 – Schéma de simulation pour la valeur de Vbe

Il en est ressorti de la simulation :

Vbe max = 0.756V

Vbe min = 0.731V

$\Rightarrow V_{be \text{ moy.}} = \frac{0.756 + 0.731}{2} = 0.743V \rightarrow$ c'est cette valeur qui sera utilisée dans les calculs pour Vbe.

\rightarrow Le calcul détaillé de R1 et R2 se trouve en annexe.

Après transformation de la formule, nous trouvons :

Nom	Résistances calculées	Résistance normalisées
R1	865.68 Ω	820 Ω
R2	746.25 Ω	680 Ω

3 Simulation

3.1 Objectifs

L'objectif principal de cette simulation est de valider la conception du montage émetteur-suiveur, en s'assurant qu'il respecte les contraintes du cahier des charges TTL en régime statique (DC).

3.2 Schéma de simulation

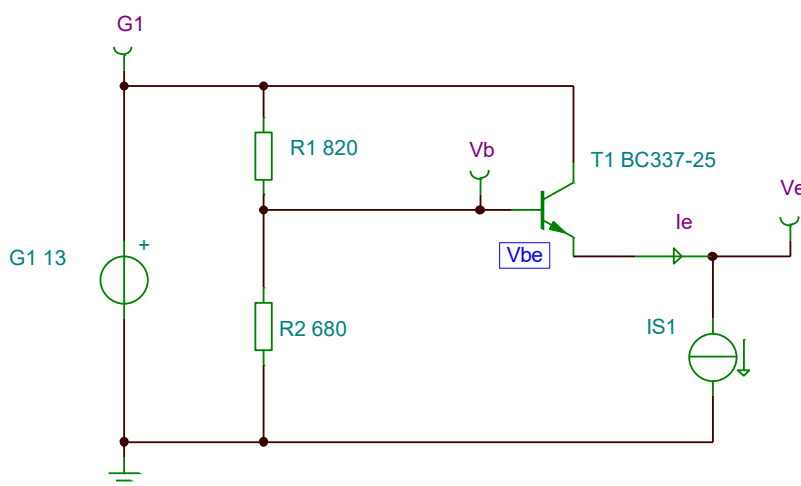


Figure 3.2 – Schéma de simulation

3.3 Méthode de simulation

Pour la simulation, le transistor BC337-25 est utilisé, car c'est celui qui est disponible dans le stock de l'ETML.

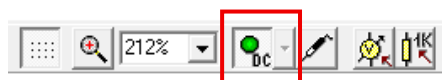
Le montage sera alimenté une 1^{ère} fois en 12V puis une 2^{ème} fois en 13V, valeurs choisies dans la plage autorisée dans la consigne (12V à 13V) pour optimiser la tension de base (Vb) et garantir que Ve se situe dans la plage de sortie imposée (4.75V à 5.25V).

La simulation à 12V sera faite avec les résistances précises calculées et aussi avec les valeurs normalisées de série E12 ajustées par itération pour positionner la tension de sortie (Ve) dans la plage TTL spécifiée.

La même chose pour la simulation avec 13V.

La source de courant modélise la charge variable du circuit (consommation du montage TTL). Elle sera réglée à des valeurs différentes pour les mesures soit de 10mA à 25mA par palier de 5mA.

Pour évaluer la performance du montage en régime statique face à la variation de charge, il faut utiliser l'analyse par balayage DC de Tina comme montré ci-dessous.



3.4 Résultat de simulation

3.4.1 Simulation pour 12V, résistances calculées

Ie [mA]	G1 [V]	R1 [Ω]	R2 [Ω]	Ve [V]
10	12	865	746	4.8
15	12	865	746	4.78
20	12	865	746	4.76
25	12	865	746	4.74

Figure 3.4.1 – Résultats de simulation pour 12V, résistances calculées

3.4.2 Simulation pour 12V, résistances ajustées

Ie [mA]	G1 [V]	R1 [Ω]	R2 [Ω]	Ve [V]
10	12	820	680	4.68
15	12	820	680	4.66
20	12	820	680	4.65
25	12	820	680	4.63

Figure 3.4.2 – Résultats de simulation pour 12V, résistances ajustées

3.4.3 Simulation pour 13V, résistances calculées

Ie [mA]	G1 [V]	R1 [Ω]	R2 [Ω]	Ve [V]
10	13	865	746	5.26
15	13	865	746	5.24
20	13	865	746	5.22
25	13	865	746	5.21

Figure 3.4.3 – Résultats de simulation pour 13V, résistances calculées

3.4.4 Simulation pour 13V, résistances ajustées

Ie [mA]	G1 [V]	R1 [Ω]	R2 [Ω]	Ve [V]
10	13	820	680	5.14
15	13	820	680	5.12
20	13	820	680	5.1
25	13	820	680	5.08

Figure 3.4.4 – Résultats de simulation pour 13V, résistances ajustées

3.5 Analyse

L'objectif de cette étape était d'évaluer quatre configurations potentielles du circuit émetteur-suiveur pour identifier celle qui respecte la contrainte TTL de maintenir la tension de sortie (V_e) entre 4.75V et 5.25V sur toute la plage de courant de charge (I_e) allant de 10mA à 25mA.

Simulations à 12V :

Les deux scénarios utilisant une tension d'alimentation de 12V sont rejetés en raison de tensions de sortie généralement trop basses.

- **Résistances calculées :** La tension varie de 4.8V à 4.74V. Bien que proche de la limite, une valeur tombe en dessous du minimum spécifié (4.75V) lorsque le courant de sortie (I_e) atteint 25mA
- **Résistances ajustées :** Les tensions obtenues de 4.68V à 4.63V sont systématiquement trop faibles

Dans les deux cas à 12V, la tension de base (V_b) fixée par le pont diviseur, n'est pas suffisamment élevée pour garantir V_e au-dessus de 4.75V après soustraction de V_{be} . Il est donc nécessaire d'augmenter la tension d'alimentation à 13V pour élever V_b .

Simulations à 13V :

- **Résistances calculées :** La tension varie de 5.26V à 5.21V. Bien que proche de la limite, une valeur se trouve en dessus du maximum spécifié (5.25V) lorsque le courant de sortie (I_e) est de 10mA.
- **Résistances ajustées :** C'est le seul scénario qui valide entièrement le cahier des charges. Les tensions de sorties simulées varient de 5.14V à 5.08V, ces valeurs sont totalement comprises dans la plage spécifiée (4.75V à 5.25V).

Le fait que les résultats diffèrent des calculs peuvent être dû au choix de valeur fixes ou moyenne pour h_{fe} et V_{be} . En prenant ces valeurs fixes pour h_{fe} et V_{be} , on ne tient plus compte des conditions réelles de fonctionnement du transistor ce qui ne peut pas prédire la réponse du circuit aux variations de courant, car il ignore les dépendances.

4 Mesures

4.1 Objectif

L'objectif de la mesure est la vérification des caractéristiques du montage en mesurant la courbe de la tension de sortie (V_e) en fonction du courant de sortie (I_e) en faisant varier une charge (R_{ch}) pour confirmer que V_e reste dans la plage de spécification.

4.2 Schéma de mesure

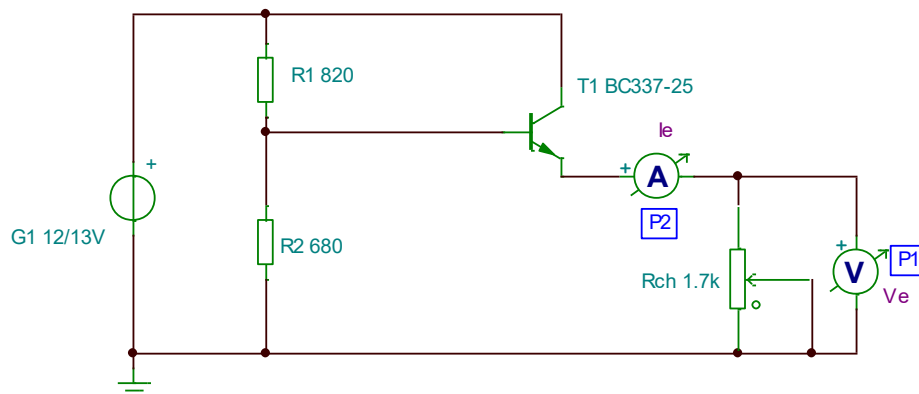


Figure 4.2 – Schéma de mesure du montage émetteur-suiveur

4.3 Méthode de mesure

Réaliser le montage émetteur-suiveur sur une plaque d'expérimentation selon le schéma ci-dessus (figure 4.2) avec un transistor BC337-25 ainsi que des résistances normalisées de la série E12 ($R_1 = 820\Omega$, $R_2 = 680\Omega$).

Relier la source d'alimentation DC (G1) au montage, en réglant initialement la tension à 13V. La tension sera changée pour effectuer également les mêmes mesures pour 12V.

La résistance de charge (R_{ch}) a été installée entre l'émetteur (V_e) et la masse. Son rôle est de modéliser la consommation variable du montage TTL de 0mA à 25mA et d'obtenir les différents paliers de courant I_e pour la caractérisation du régime statique.

Connecter le voltmètre (P1) en parallèle de R_{ch} entre l'émetteur (V_e) et la masse pour mesurer la tension de sortie V_e .

Connecter l'ampèremètre en série avec le potentiomètre pour mesurer le courant de sortie I_e .

L'acquisition des données se fera par paliers en faisant varier le courant de sortie (I_e).

Démarrage : Ne pas mettre le potentiomètre car nous faisons la mesure pour 0mA donc en circuit ouvert.

Variation de I_e : Régler le potentiomètre progressivement pour obtenir des valeurs de courant de sortie allant de 0mA à 25mA par pas de 5mA.

Les résultats seront consignés dans un tableau de mesure $V_e = f(I_e)$ pour chaque tension d'alimentation.

4.4 Résultat de mesure G1 = 13V

Ie [mA]	Ve [V]	Rch [Ω]
0(circuit ouvert)	5.52	
5.04	5.28	1047.6
10.03	5.28	526.4
15.02	5.26	350.2
20.05	5.25	261.8
25.03	5.25	209.7

Figure 4.4.1 – Tableau des résultats de mesure pour une tension d'alim. de 13V

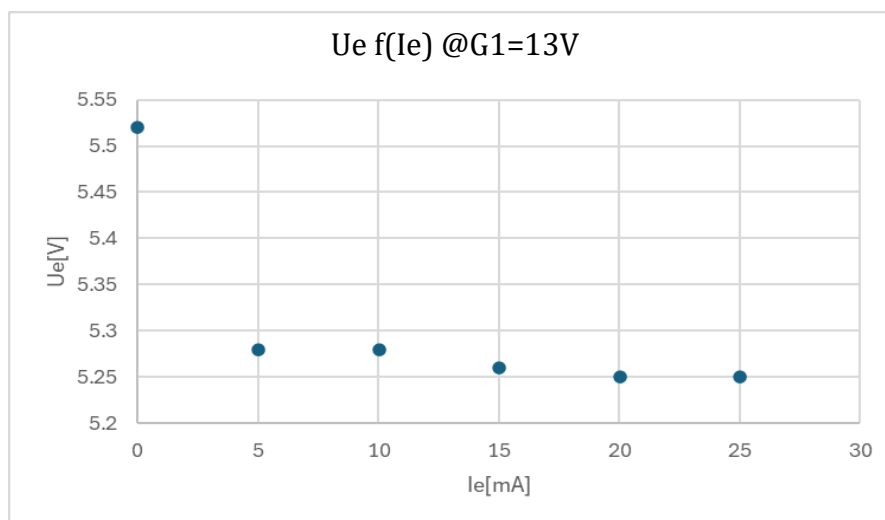


Figure 4.4.2 – Courbe de la tension de sortie en fonction du courant Ie

L'objectif de cette mesure était de tester le comportement du montage sous la tension d'alimentation maximale (13V) avec les résistances normalisées (R1 = 820Ω, R2 = 680Ω). Les résultats montrent que la tension de sortie Ve varie de 5.52V (circuit ouvert) à 5.25V (Ie = 25mA).

Analyse par rapport au cahier des charges (plage de 4.75V à 5.25V) :

La tension supérieure de la plage spécifiée (5.25V) est dépassée pour les courants de sorties faibles, notamment en circuit ouvert et jusqu'à 15mA (5.28V mesuré).

Ce dépassement de la limite haute s'explique principalement par le gain en courant (hfe) réel du transistor BC337-25 qui est supérieur à la valeur minimale choisie pour le dimensionnement des composants.

En termes de régulation, le montage se comporte comme attendu d'un émetteur suiveur : la tension de sortie Ve est très stable entre 5mA et 25mA, ne chutant que de 0.03V.

Le calcul du gain a été refait afin de trouver sa valeur réelle qui est bien au-dessus la valeur prise dans la datasheet. La formule pour calculer le gain d'un transistor est :

$$Hfe_{réel} = \frac{I_c}{I_b} \rightarrow (\text{Mesures et calculs du gain Hfe en annexe})$$

4.5 Résultat de mesure G1 = 12V

Ie [mA]	Ve [V]	Rch [Ω]
0(circuit ouvert)	5.05	
5.01	4.79	956.1
10.02	4.77	476.0
14.99	4.76	317.5
20	4.75	237.5
25.02	4.75	189.8

Figure 4.5.1 – Tableau des résultats de mesure pour une tension d'alim. de 12V

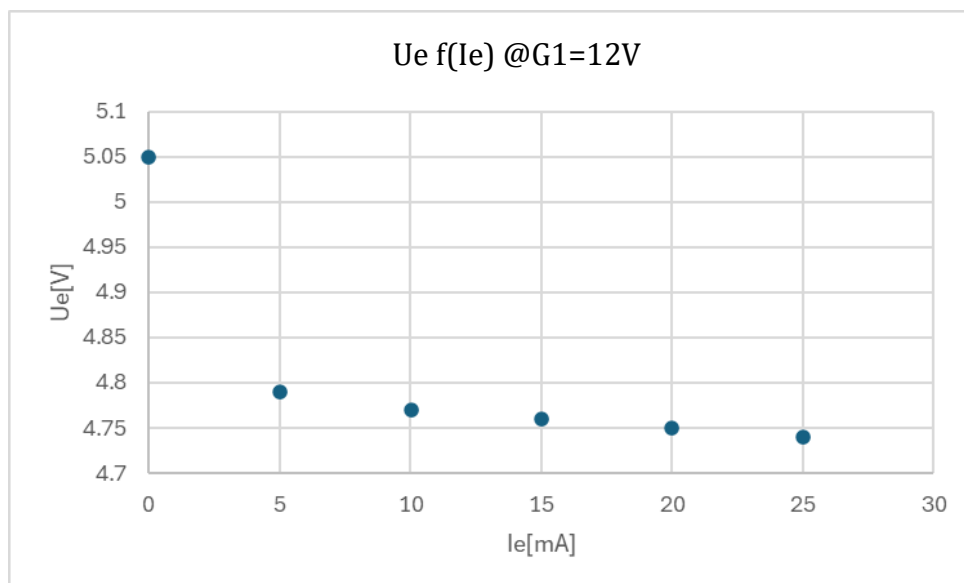


Figure 4.5.2 – Courbe de la tension de sortie en fonction du courant Ie

Cette mesure a été réalisée sous la tension d'alimentation minimale (12V) avec les résistances normalisées ($R1 = 820\Omega$, $R2 = 680\Omega$) pour évaluer la performance du circuit dans le worst case de l'alimentation. Les résultats montrent une variation de la tension de sortie V_e de 5.05V (circuit ouvert) à 4.75V ($I_e = 25\text{mA}$).

Analyse par rapport au cahier des charges (plage de 4.75V à 5.25V) :

Contrairement aux simulations avec cette tension d'alimentation, les mesures pratiques montrent que les tensions obtenues se trouvent entièrement dans la plage spécifiée dans le cahier des charges.

Ce résultat est important car il confirme que l'effet du gain réel élevé a compensé l'erreur de conception initiale.

La régulation est également excellente : la tension de sortie est stable, atteignant précisément la limite minimale de la plage (4.75V) seulement lorsque la charge est minimale ($I_e = 25\text{mA}$).

4.6 Comparaison avec la simulation

Pour le cas où $G1 = 13V$:

En comparant la simulation ($G1 = 13V$, résistances ajustées) avec la mesure ($G1 = 13V$, résistances ajustées), on peut voir qu'en pratique, la tension de sortie (V_e) est systématiquement supérieure à la simulation. Pour la simulation la plage était de 5.08V à 5.14V et pour la mesure la plage est de 5.25V à 5.52V. Cet écart s'explique par le gain h_{fe} réel du transistor qui est beaucoup plus élevé (272 à 302.9) que le h_{fe} min (160 utilisé pour le dimensionnement). Un gain plus élevé, réduit la chute de tension interne et augmente légèrement V_e .

Pour le cas où $G1 = 12V$:

En comparant la simulation ($G1 = 12V$, résistances ajustées) avec la mesure ($G1 = 12V$, résistances ajustées), on peut voir qu'en pratique, la tension de sortie (V_e) se situe dans la plage demandée contrairement à la simulation. Pour la simulation la plage était de 4.63V à 4.68V et pour la mesure la plage est de 4.75V à 5.05V. C'est le seul scénario de mesure qui valide le cahier des charges. Le fait que les mesures à 12V respectent la plage demandée (alors que les simulations ne le faisaient pas) confirme que l'erreur initiale dans le dimensionnement (basé sur h_{fe} min = 160) a été compensée en pratique par le h_{fe} réel plus élevé.

5 Conclusion

Au terme de ce travail pratique, un montage émetteur suiveur a été conçu, simulé et réalisé avec succès, capable d'adapter une tension d'alimentation variable (12V à 13V) pour alimenter une charge TTL.

Les mesures expérimentales ont démontré la fiabilité du montage émetteur-suiveur. De manière significative, c'est le scénario de tension d'alimentation minimale ($G1 = 12V$) qui a le mieux validé le cahier des charges en pratique (plage de 4.75V à 5.05V). Le fait que les mesures à 12V ont été validées contrairement aux simulations à 12V, est principalement dû au gain en courant (h_{fe}) réel du transistor BC337-25 étant nettement supérieur (272 à 302.9) au h_{fe} min théorique utilisé dans le dimensionnement initial.

Ce TP a souligné l'importance du dimensionnement précis pour l'adaptation de charge, et la nécessité de prendre en compte les variations des paramètres réels du composant (notamment h_{fe}) qui peuvent impacter significativement la tension de polarisation du circuit final.

Lausanne, le 10 novembre 2025



Loïc Marmy



Mathéo Bonny

6 Annexes

6.1 Calcul de R1 et R2

$$\frac{V_{be} + U_{rch}^{\min}}{G_1 - \frac{R_1 \cdot I_{e}^{\min}}{\beta + 1}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

worst case "max" = worst case "min"

$$\frac{V_{be} + U_{rch}^{\max}}{G_{1\max} - \frac{R_1 \cdot I_{e\min}}{\beta + 1}} = \frac{V_{be} + U_{rch}^{\min}}{G_{1\min} - \frac{R_1 \cdot I_{e\max}}{\beta + 1}}$$

$$\frac{0,743 + 5,25}{13 - \frac{R_1 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{160 + 1}} = \frac{0,743 + 4,75}{12 - \frac{R_1 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{160 + 1}}$$

$$\frac{5,99}{\left(\frac{2093 - R_1 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{161} \right)} = \frac{5,49}{\left(\frac{1932 - R_1 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{161} \right)}$$

$$5,99 \left(\frac{1932 - R_1 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{161} \right) = 5,49 \left(\frac{2093 - R_1 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{161} \right)$$

$$\frac{11572,68 - R_1 \cdot 149,75 \cdot 10^{-3}}{161} = \frac{11490,57 - R_1 \cdot 54,9 \cdot 10^{-3}}{161}$$

$$11572,68 - 11490,57 = 149,75 \cdot 10^{-3} \cdot R_1 - 54,9 \cdot 10^{-3} \cdot R_1$$

$$82,11 = 94,85 \cdot 10^{-3} \cdot R_1 \Rightarrow R_1 = \frac{82,11}{94,85 \cdot 10^{-3}} = 865,68 \, \Omega$$

$$R_2 = \frac{R_1 \left[\frac{V_{be} + U_{rch}}{G_1 - \frac{R_1 \cdot I_e}{\beta + 1}} \right]}{1 - \left[\frac{V_{be} + U_{rch}}{G_1 - \frac{R_1 \cdot I_e}{\beta + 1}} \right]} = \frac{865,68 \left[\frac{0,743 + 5}{12,5 - \frac{865,68 \cdot 17,5 \cdot 10^{-3}}{161}} \right]}{1 - \left[\frac{0,743 + 5}{12,5 - \frac{865,68 \cdot 17,5 \cdot 10^{-3}}{161}} \right]} = 746,25 \, \Omega$$

Figure 6.1 – Calcul détaillé de R1 et R2

6.2 Mesure du gain Hfe

Schéma de mesure :

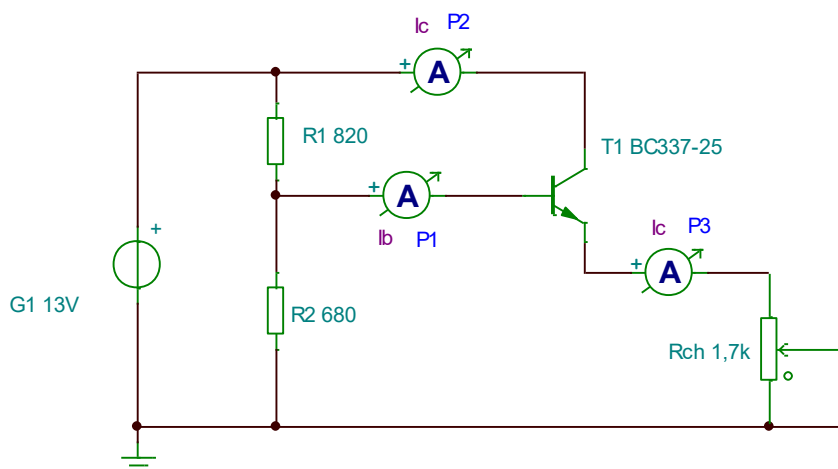


Figure 6.2.1 – Schéma de mesure des différents courants du transistor

Résultat de la mesure :

$$Hfe_{réel} = \frac{Ic}{Ib}$$

Ic[mA]	Ib[uA]	Ie[mA]	hfe
4.95	18.2	5	272.0
9.91	35.3	10	280.7
15.9	52.5	15.1	302.9
19.94	68.7	20	290.2
24.92	84.3	25	295.6

Figure 6.2.2 – Résultat de mesure des courants (Ib, Ic et Ie)

6.3 Matériel utilisé

Rch: Potentiomètre Trimmer, 1.7kΩ du stock ES

R1 : Résistance THT, 820Ω du stock ES

R2 : Résistance THT, 680 Ω du stock ES

G1: Alimentation, Seefram 6330 DC Power supply ES.SLO.02.06

P1: Multimètre, Amprobe 34XR-A 19050311A

P2: Multimètre, Gwinstek GDM-396 R112-01

P3: Multimètre, Gwinstek GDM-396 R112-03

T1: Transistor bipolaire, BC337-25 du stock ES