

Développement d'un traceur de caractéristiques de quadripôles et son utilisation en séance de travaux pratiques

D. Guérineau, L. Fache, C. Aupetit-Berthelemot, P. Medrel

Ecole d'ingénieurs ENSIL-ENSCI, Spécialité Electronique et Télécommunications,
Université de Limoges, Limoges, France
Pôle Limousin de Microélectronique (PLM)
Contact email : pierre.medrel@unilim.fr

Dans le cadre d'un projet d'études techniques, deux étudiants en 2^{ème} du cycle ingénieur à l'ENSIL-ENSCI à Limoges ont réalisé un traceur automatique de caractéristiques de transistors (à effet de champ et bipolaire). Cet outil permet aujourd'hui aux étudiants en travaux pratiques d'électronique analogique de disposer des caractéristiques courant-tension et des paramètres dynamiques petit signal basse fréquence réalistes du composant utilisé en séance lors de la synthèse de leur circuit afin de répondre au cahier des charges spécifié. Ce papier présentera d'une part la construction de ce traceur de caractéristique (matériel utilisé, éléments de programmation ...) et d'autre part l'utilisation de ces courbes lors de la synthèse d'un circuit amplificateur de tension à base d'un transistor bipolaire.

I. Introduction

Au cours des différentes séances de travaux pratiques d'électronique analogique menées en première année du cycle ingénieur de l'ENSIL-ENSCI en spécialité Electronique et Télécommunications, des expérimentations sont menées autour des transistors, qui sont des composants essentiels de l'électronique et dont le fonctionnement est difficile à appréhender pour les étudiants. Au cours de ces TP, des fonctions électroniques simples sont abordées (montages amplificateur de tension, adaptateur d'impédance etc...) et leurs synthèses nécessitent la connaissance fine des paramètres dynamiques du transistor afin de satisfaire au cahier des charges spécifié. Ces paramètres sont en général mesurés graphiquement lors de la séance et déduits de courbes typiques fournies par les constructeurs. Bien que correcte, cette façon de procéder requiert des étapes d'optimisation empirique des différents éléments (résistances) qui, bien que nécessaires, nuisent à la compréhension globale du circuit pour l'étudiant. Chaque binôme peut alors, en début de la séance de travaux pratiques, mesurer les paramètres réels du transistor utilisé, de façon à construire le plus intelligemment possible son circuit en supprimant les étapes fastidieuses d'essais.

II. Outil expérimental de mesure des caractéristiques des composants

Le banc développé est construit au moyen de deux sources de tension (E3631A) et deux ampèremètres de précision (34465A et 34470A) de la société Keysight, pilotés au moyen d'un contrôleur GPIB-USB de la société National Instrument. Tous ces matériels ont été acquis dans le cadre des moyens d'investissement du CNFM 2017. Les mesures sont pilotées par le logiciel de programmation graphique LabVIEW. Une photographie et le synoptique du banc ainsi que la salle de TP sont montrés en figure 1.

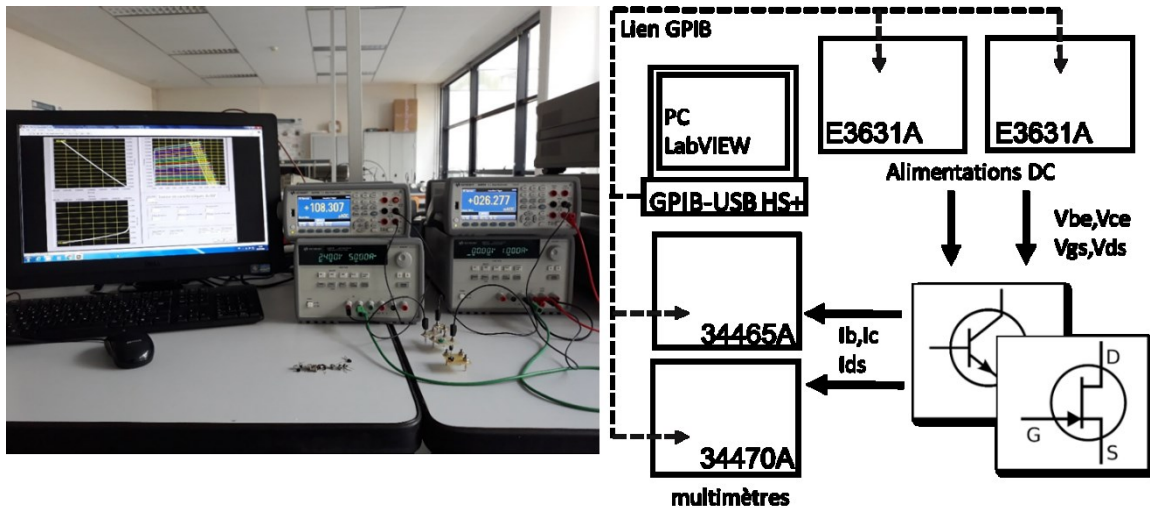


Figure 1 : Photographie et synoptique du banc de mesure des caractéristiques courant-tension développé

Les opérations sont synchronisées de façon à appliquer les tensions de commandes aux accès des ports du quadripôle (tensions V_{be} et V_{ce} dans le cadre d'un transistor bipolaire, et V_{gs} et V_{ds} dans le cadre d'un transistor à effet de champ), puis à mesurer les réponses en courant sur les ports d'entrée et de sortie (courants I_b et I_c dans le cadre d'un transistor bipolaire et I_{ds} dans le cadre d'un transistor à effet de champ). La procédure suivie consiste à appliquer point à point toutes les combinaisons de tensions et à mesurer les réponses en courant correspondantes de façon à décrire le réseau I-V du transistor. D'une façon générale, des opérations sont effectuées entre les tensions et courants mesurés de façon à disposer des 3 potentiels aux accès pour pouvoir tracer le réseau de caractéristiques. Les fichiers de points obtenus servent ensuite de base au calcul des paramètres dynamiques des transistors. Ces paramètres sont considérés équivalents aux paramètres dynamiques basse fréquence (paramètres h ou y selon le transistor), obtenus point à point en courant continu. Ils correspondent à des réponses quasi-statiques des transistors, et ne prennent pas en compte les effets dispersifs ni les effets thermiques. La prise en compte de ces effets n'est pas nécessaire compte tenu des fréquences de travail des circuits et des capacités de dissipation des boîtiers utilisés.

L'utilisation du logiciel de programmation LabVIEW offre l'avantage d'un interfaçage graphique natif aisé, sans nécessité de programmer une interface supplémentaire, gage d'une utilisation ultérieure efficace du traceur, et correspond également au choix des étudiants de se perfectionner dans ce langage de programmation.

Tracé des courbes IV d'un transistor à effet de champ 2N3819 :

La réponse non linéaire en courant I_{ds} dans un transistor à effet de champ étant directement liée aux potentiels appliqués V_{gs} et V_{ds} , l'effet transistor est directement visualisable sur le courant mesuré sur le port de drain. Le tracé des courbes courant-tension est relativement aisé et ne nécessite que la mesure des deux premiers quadrants du réseau de caractéristiques ; le multimètre de table permettant la mesure du courant d'entrée n'est pas utilisé dans ce cas.

Le transistor utilisé est un transistor 2N3819, c'est un transistor JFET canal N à appauvrissement, qui sera bloqué pour une valeur V_{gsoff} négative et conducteur au repos. La mesure consiste à appliquer, pour chaque valeur de V_{gs} , toutes les valeurs de V_{ds} comprises entre 0V et V_{dsmax} . Nous choisissons une valeur maximale de V_{ds} qui

correspond à l'utilisation graphique (tracé des droites de charges, point de fonctionnement) qui en sera faite ultérieurement lors des séances de TP, typiquement de 10V, ainsi qu'une valeur maximale de V_{gs} de 0V, ce qui correspond au maximum que peut délivrer l'alimentation une fois la polarisation choisie. De cette façon la puissance DC sur le drain est bien inférieure à la puissance maximum tolérable par le transistor de façon à prévenir toute dégradation du composant. Les valeurs obtenues sont tout à fait répétables pour un transistor donné, mais varient bien entendu d'un composant à un autre (dispersion en I_{dss} et V_p des composants notamment).

Les courbes obtenues sont représentées à la figure 2. Une fois ces données mesurées, l'utilisateur peut alors spécifier un point de repos autour duquel il souhaite obtenir les paramètres dynamiques de son composant, et qui seront utilisés comme base des calculs des éléments de polarisation en séance de TP. On mesure pour ce transistor au point de repos spécifié les paramètres suivants :

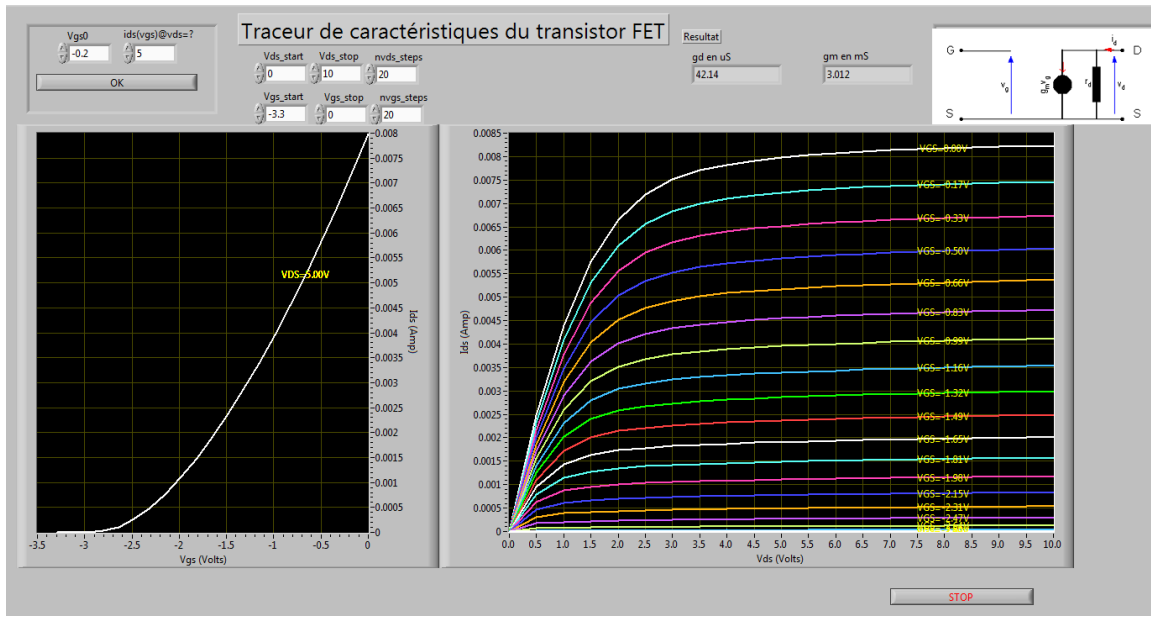


Figure 2 : Caractéristiques de transfert et de sortie d'un transistor 2N3810 mesuré, ainsi que ses paramètres dynamiques associés

Paramètre	Valeur mesurée (@ $V_{gs}=-0,2V$, $V_{ds}=5V$)	Données constructeur [1] (@ $V_{gs}=0V$, $V_{ds}=15V$)
Gm (mS)	3	$3 < G_m < 6.5$
Gds (μs)	42	40
I_{dss} (mA)	8	$2 < I_{dss} < 20$
V_{gs_off} (V)	-3	Max -8

Tracé des courbes IV d'un transistor bipolaire 2N2219

Le fonctionnement d'un transistor bipolaire est nettement plus complexe, et la mesure expérimentale de ses paramètres est difficile sans matériel dédié. D'une part la commande en tension à l'entrée $V_{be}(t)$ est appliquée au travers une jonction base-émetteur polarisée en direct, et ajoute une forte non linéarité, et d'autre part sa réponse est elle-même fortement liée à l'état thermique de la jonction. La solution pour remédier à ce problème

consiste classiquement à polariser le transistor bipolaire au moyen d'une source de courant, dans la base ou dans l'émetteur de façon à contrôler l'état thermique de la jonction [2].

Dans notre cas, il n'est pas possible de disposer d'une source de courant de table de précision. Nous polarisons la base avec une source de tension de table et nous associons classiquement une résistance dans l'émetteur, de façon à réaliser une contre réaction thermique et assurer un point de fonctionnement stable de la jonction base-émetteur.

Le fonctionnement du transistor bipolaire nécessite la connaissance des 4 quadrants dans le réseau de caractéristiques, néanmoins afin de rester le plus efficace possible lors de l'utilisation de l'outil avec les étudiants, il a été décidé de ne conserver que les courbes au point de repos choisi dans les quadrants 2 et 3 et de ne pas tracer le 4^{ème} quadrant. Ici encore, la mesure consiste à appliquer, au travers des 2 résistances R_c et R_e connues avec précision et dont les valeurs sont des paramètres du programme, toutes les combinaisons des tensions V_{ce} et V_{be} de façon à décrire les zones de saturation, de blocage et active du transistor en polarisant les jonctions (on fera l'approximation que $I_c = I_e$ dans les calculs de V_{ce} et V_{be}). Il est à noter que la connaissance des trois potentiels effectivement appliqués aux accès du transistor nécessite des étapes de calculs, effectuées d'après les données mesurées des courants, tension, et résistances. Nous choisissons des valeurs maximales de V_{ce} et V_{be} qui correspondent d'une part à l'utilisation graphique qui en sera faite en TP et de façon à respecter les puissances maximales tolérables par le composant de façon à prévenir toute dégradation.

Une fois mesurées, les courbes IV ainsi que les paramètres mesurés sont représentés en figure 3. Ici encore les paramètres calculés sont proches des valeurs typiques constructeur et leurs valeurs sont relativement répétables. Une faible variance est à noter dans la valeur du paramètre h_{11} , ce qui est très probablement lié à notre technique de polarisation.

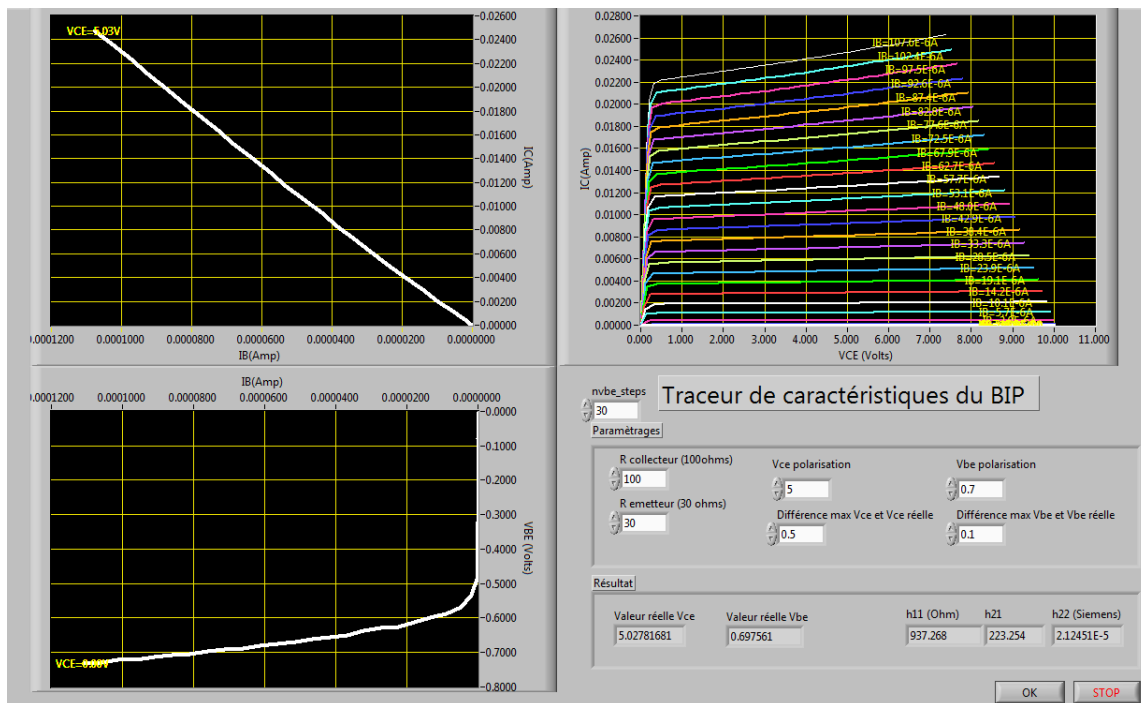


Figure 3 : Réseau de caractéristiques IV d'un transistor 2N2219 mesuré ainsi que ses paramètres dynamiques associés

Paramètre	Valeur mesurée	Données constructeur [3]
h11	937 Ω	--
h22	21 μS	Typ 15 à 200 μS
h21	223	Typ. 100 à 300

III. Cas d'utilisation du traceur développé : synthèse d'un amplificateur à transistor bipolaire

Une fois opérationnel, l'outil a été inséré dans la salle de TP afin d'être utilisé en séance. Chaque groupe de TP peut ainsi mesurer les caractéristiques propres de son composant avant de construire son circuit. Ces séances d'électronique analogique sont proposées au premier semestre et constituent pour partie une remise à niveau puis un approfondissement, à la fois sur l'utilisation de l'instrumentation en électronique (GBF, oscilloscope, alimentation flottante...) et sur les notions abordées en séance de travaux dirigés sous forme d'exercices. Les notions abordées restent simples, et l'accent est mis sur la prise d'autonomie en séance et la compréhension fonctionnelle des circuits. Le TP proposé s'insère dans une rotation de 5 TP qui traitent de différentes fonctions importantes de l'électronique analogique (amplificateur, adaptateur d'impédance, conversion d'énergie...) et consiste pour cet exemple en la synthèse d'un montage amplificateur de tension construit autour d'un transistor bipolaire 2N2219. Le montage ainsi que le cahier des charges sont les suivants :

Gain en tension	Impédance d'entrée	Fréquence centrale de travail	Polarisation
-10	5k Ω	1kHz	10V

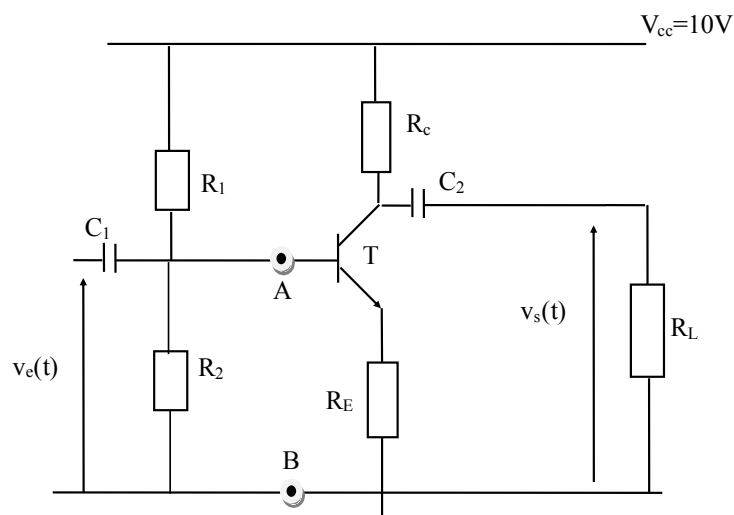


Figure 4: Schéma électrique du circuit amplificateur de tension traité dans le TP construit autour d'un transistor 2N2219 et jeu d'équations reliant les éléments du montage et les paramètres du cahier des charges

$(R_1//R_2) \gg (h_{11} + \beta R_E)$: insensibilité des performances dynamiques vis-à-vis du réseau de polarisation d'entrée

$$G_v = \frac{-\beta R_C}{h_{11} + (h_{21} + 1)R_E} : \text{gain en tension à vide du montage}$$

$R_e = (R_1//R_2) // (h_{11} + (h_{21} + 1)R_E)$: impédance (résistance) d'entrée du montage

Au moment de commencer la séance, chaque groupe d'étudiant dispose de l'analyse théorique reliant les différents paramètres circuit (gain, impédances...) aux éléments du montage et aux paramètres électriques du transistor (résistances, capacités, paramètres h). Ce jeu d'équations leur permet, une fois les paramètres électriques de leur transistor connus, de calculer les éléments requis. En séance, ils câblent leur circuit puis le mesure à l'aide des instruments disponibles (oscilloscope, multimètres, alimentations DC et GBF), et vérifie le fonctionnement correct souhaité de leur montage, validant ainsi l'approche théorique sans avoir à procéder à des étapes d'optimisation empiriques qui nuisent à leur bonne compréhension.

IV. Conclusion

Un traceur de caractéristiques de transistor a été développé par des étudiants au cours de leur projet d'études techniques de seconde année du cycle d'ingénieur. Ce projet s'écoule tout au long de l'année et est mené en autonomie en suivant les méthodes de gestion de projet apprises au sein de leur cursus ingénieur. Le développement de ce traceur permet son utilisation au cours des séances de travaux pratiques d'électronique analogique de 1^{ère} année du cycle ingénieur, leur permettant d'obtenir les courbes courant-tension pour effectuer leurs expérimentations. Au travers des moyens investis via le financement du CNFM dans le cadre de ce projet technique, les étudiants ont ainsi pu mettre à profit leurs connaissances en électronique analogique acquises et développer des compétences en pilotage d'instruments, qui constitue un domaine des sciences de l'ingénieur qui requière patience et persévérance.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le soutien du GIP CNFM dans ce projet d'étude, qui a permis d'acheter les équipements du traceur de caractéristiques au travers du Pôle Limousin de Microélectronique (PLM).

Références

1. datasheet FET 2N3819 <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/2N3819-D.PDF>
2. K.K.Clarke and D.T.Hess, Communication circuits : analysis and design, Addison-Wesley publishing company, 1971
3. datasheet BJT 2N2219A (STMicroelectronics) http://www.farnell.com/datasheets/1449532.pdf?_ga=2.187115692.584096092.1539080607-586192009.1461675533