



ENSEA

Beyond Engineering

COMPTE RENDU DE TP

Composants et Systèmes RF

TP3 : Mesures de facteur de bruit

3^{eme} année

Année : 2025 - 2026

Camille LANFREDI, Valentin JOSSERON
Novembre 2025

Table des matières

1 Mesure d'un quadripôle passif	2
1.1 Préparation	2
1.2 Mesures	3
1.2.1 Méthode Y - Protocole chaud/froid	3
1.2.2 Chaîne seule (sans quadripôle)	3
1.2.3 Chaîne + quadripôle	4
1.2.4 Gain disponible	4
1.2.5 Facteur de bruit du quadripôle	4
1.2.6 Discussion	5
2 Mesure d'un quadripôle actif	6
2.1 Préparation	6
2.2 Influence du point de polarisation	7
2.2.1 Mesures	7
2.2.2 Discussion des résultats	8
2.2.3 Comparaison avec la datasheet	9
3 Annexes	10
3.1 Annexe A : Tableau des mesures - Influence de la polarisation sur le facteur de bruit	10

1 Mesure d'un quadripôle passif

1.1 Préparation

Le montage utilisé pour la mesure du facteur de bruit d'un quadripôle passif comporte deux isolateurs placés de part et d'autre du quadripôle. Leur rôle est d'assurer une adaptation stable et indépendante de la configuration chaud/froid de la diode de bruit.

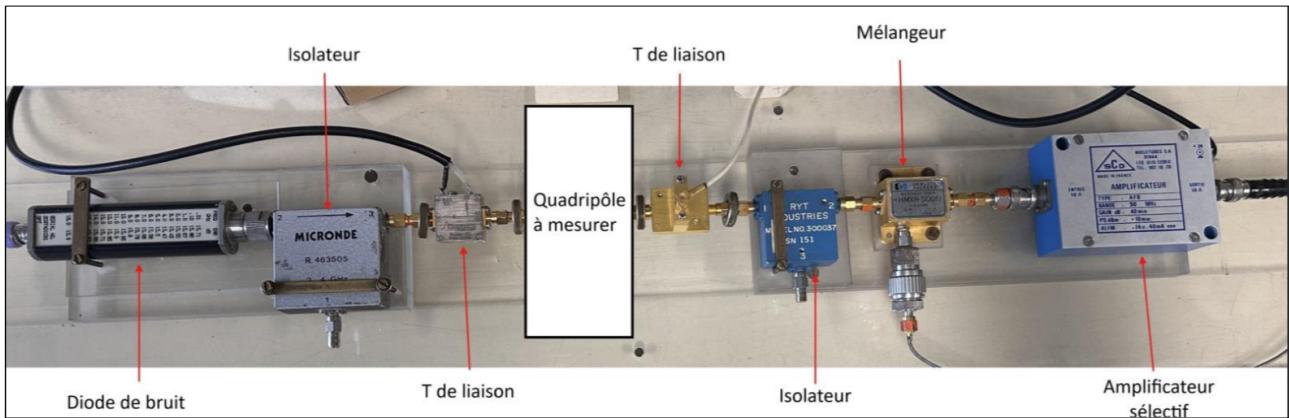


Figure 1: Banc de mesure du facteur de bruit d'un quadripôle passif.

Isolateur côté source de bruit Cet isolateur garantit que la diode voit en permanence une charge 50Ω , quel que soit l'état du quadripôle ou les variations d'impédance du banc. Il supprime les réflexions vers la diode et stabilise l'ENR appliquée à l'entrée de la chaîne.

Isolateur côté mélangeur Le second isolateur empêche les réflexions du mélangeur de remonter vers le quadripôle. Cela évite les variations d'adaptation au niveau du dispositif mesuré, ce qui est indispensable pour une mesure reproductible du bruit.

Adaptation du quadripôle passif L'atténuateur utilisé comme DUT est un quadripôle passif parfaitement adapté (50Ω). Dans ces conditions :

$$\Gamma \approx 0, \quad G_a = |S_{21}|^2 = \frac{1}{L},$$

où L est sa perte linéaire. Comme il est passif et réciproque, son facteur de bruit correspond directement à sa perte :

$$F = L.$$

L'adaptation simplifie la mesure : il n'est pas nécessaire de connaître les paramètres S complets du quadripôle, et les expressions ne dépendent que des puissances mesurées à chaud et à froid.

Rappel sur la méthode Y La méthode des deux températures repose sur la mesure du rapport :

$$Y = \frac{P_{\text{chaud}}}{P_{\text{froid}}}, \quad y = 10^{Y_{\text{dB}}/10}.$$

La température chaude est déterminée à partir de l'ENR :

$$\frac{T_H}{T_0} - 1 = 10^{\text{ENR}/10}, \quad T_0 = 290 \text{ K}.$$

Le facteur de bruit de la chaîne seule s'obtient par :

$$F_m = \frac{\left(\frac{T_H}{T_0} - 1\right) - y \left(\frac{T_C}{T_0} - 1\right)}{y - 1}.$$

Cette préparation est ensuite utilisée pour extraire le facteur de bruit du quadripôle à l'aide de la relation de Friis.

1.2 Mesures

1.2.1 Méthode Y - Protocole chaud/froid

La méthode consiste à régler l'atténuateur calibré de manière à placer l'indicateur du mesureur de bruit sur un repère fixe lorsque la diode est à froid (diode éteinte). On commute ensuite la diode à chaud et l'on modifie l'atténuation jusqu'à retrouver exactement la même indication. La variation d'atténuation correspond au rapport de bruit Y , défini par :

$$Y = \frac{P_{\text{chaud}}}{P_{\text{froid}}}, \quad Y_{\text{dB}} = P_{\text{chaud,dB}} - P_{\text{froid,dB}}.$$

La conversion en linéaire se fait via :

$$y = 10^{Y_{\text{dB}}/10}.$$

Le facteur de bruit se déduit alors de la méthode des deux températures :

$$F = \frac{\left(\frac{T_H}{T_0} - 1\right) - y \left(\frac{T_C}{T_0} - 1\right)}{y - 1}, \quad \frac{T_H}{T_0} - 1 = 10^{\text{ENR}/10}.$$

Dans notre cas, la température froide de la diode est :

$$T_C = 22^\circ\text{C} = 295.15 \text{ K}, \quad T_0 = 290 \text{ K}.$$

1.2.2 Chaîne seule (sans quadripôle)

$$\begin{aligned} P_b^{\text{chaud}} &= 14.85 \text{ dB}, & P_b^{\text{froid}} &= 7.70 \text{ dB} \\ Y'_{\text{dB}} &= 7.15 \text{ dB}, & y' &= 5.188 \end{aligned}$$

À 3 GHz, l'ENR indiquée sur la diode vaut :

$$\text{ENR} = 15.45 \text{ dB}.$$

Par définition, l'Excess Noise Ratio s'écrit :

$$\text{ENR} = 10 \log_{10} \left(\frac{T_H - T_0}{T_0} \right).$$

On en déduit :

$$\frac{T_H - T_0}{T_0} = 10^{\text{ENR}/10} = 10^{15.45/10} = 35.075.$$

Ainsi :

$$\frac{T_H}{T_0} - 1 = 35.075.$$

Le facteur de bruit de la chaîne seule se calcule à partir de :

$$F_m = \frac{\left(\frac{T_H}{T_0} - 1\right) - y' \left(\frac{T_C}{T_0} - 1\right)}{y' - 1}.$$

Nous disposons des valeurs suivantes :

$$y' = 5.188, \quad \frac{T_H}{T_0} - 1 = 35.075, \quad \frac{T_C}{T_0} - 1 = \frac{295.15}{290} - 1 = 0.01776.$$

Substitution numérique :

$$F_m = \frac{35.075 - 5.188 \times 0.01776}{5.188 - 1}.$$

Ainsi,

$$F_m = \frac{34.9829}{4.188} = 8.371.$$

$F_m = 8.371$

1.2.3 Chaîne + quadripôle

$$P_b^{\text{chaud}} = 4.45 \text{ dB}, \quad P_b^{\text{froid}} = 2.82 \text{ dB}$$

$$Y_{\text{dB}} = 1.63 \text{ dB}, \quad y = 1.455.$$

Le facteur de bruit total obtenu est :

$F_{\text{total}} = 76.972.$

1.2.4 Gain disponible

Le gain disponible se calcule à partir des mesures à froid avec et sans quadripôle :

$$G_a = \frac{P_{NS1,Q}}{P_{NS1}} \cdot \frac{1 - y}{1 - y'}.$$

À partir des mesures relatives chaud/froid, on obtient :

$$G_a = 0.1088 \quad \Rightarrow \quad G_{a,\text{dB}} = -9.64 \text{ dB}.$$

1.2.5 Facteur de bruit du quadripôle

La formule de Friis appliquée au montage donne :

$$F_{\text{DUT}} = F_{\text{total}} - \frac{F_m - 1}{G_a}.$$

Numériquement :

$$F_{\text{DUT}} = 76.972 - \frac{8.371 - 1}{0.1088} = 9.195.$$

En dB :

$F_{\text{DUT,dB}} = 9.63 \text{ dB}.$

1.2.6 Discussion

Le quadripôle mesuré est un atténuateur passif de 10 dB adapté à 50Ω . Théoriquement, son facteur de bruit est égal à sa perte linéaire :

$$F \simeq L.$$

La valeur expérimentale obtenue (9.6 dB) est donc cohérente. Les petites différences proviennent des incertitudes de lecture, des pertes de connectique et du vieillissement du matériel.

Les deux isolateurs garantissent une adaptation stable côté source de bruit et côté mélangeur, supprimant les réflexions et stabilisant l'ENR au plan d'entrée. L'adaptation parfaite du quadripôle rend inutile l'utilisation de ses paramètres S , le gain disponible étant confondu avec le gain d'insertion.

2 Mesure d'un quadripôle actif

2.1 Préparation

$$\Gamma_G = \Gamma_M = 0 \quad (\text{source et charge adaptées})$$

$$G_{\text{insertion}} = |S_{21}|^2$$

$$G = \frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{22}|^2} \quad (\text{gain d'association})$$

f_m : connecter directement à la source bruit

$$f_{m0} = f'_m$$

⇒ Le mesureur est placé à la sortie du transistor, effet ramené à l'entrée du transistor par Friis :

$$f_{\text{mes}} = 1 + \frac{f'_m - 1}{G_1}$$

avec :

$$G_1 = G_a$$

$$f_{\text{mes}} = 1 + \frac{f'_m - 1}{G_a}$$

et comme :

$$G_a = \frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{22}|^2}$$

on obtient :

$$F_{\text{mes, sortie}} = 1 + \frac{F_m - 1}{G_a} = 1 + \frac{\frac{F_m - 1}{G_{\text{ins}}}}{1 - |S_{22}|^2}$$

2.2 Influence du point de polarisation

2.2.1 Mesures

Pour chaque point de polarisation I_{DS} , la procédure chaud/froid est appliquée de la même manière que dans la partie 2 : réglage à froid, commutation à chaud, puis ajustement de l'atténuateur calibré pour retrouver le même niveau d'indication. On en déduit Y_{dB} puis $Y_{lin} = 10^{Y_{dB}/10}$.

Le rapport de bruit mesuré en sortie du transistor est noté F_{mes} . Le facteur de bruit propre du transistor est ensuite obtenu via :

$$F_{mes, \text{sortie}} = 1 + \frac{F_m - 1}{G_a} = 1 + \frac{\frac{F_m - 1}{G_{ins}}}{\frac{1 - |S_{22}|^2}{1 - |S_{22}|^2}}$$

Dans notre cas, la chaîne seule possède :

$$F'_m = 8.37, \quad Y'_{lin} = 5.19.$$

Les mesures obtenues pour les différents courants I_{DS} sont rassemblées dans le tableau suivant :

I_{DS} (mA)	S_{22}	G_a	$G_{a,dB}$	F_t	F_{DUT}	$F_{DUT,dB}$
63.2	0.207	43.75	16.41	1.70	1.53	1.83
29.5	0.208	44.96	16.53	1.56	1.39	1.43
13.7	0.276	29.66	14.72	1.64	1.37	1.37
6.3	0.385	25.17	14.01	1.77	1.42	1.51
1.01	0.707	9.43	9.75	3.73	2.06	3.14
0.46	0.807	3.58	5.54	5.82	3.82	5.82

Le tableau complet est donné en annexe A, page 10 .

Cela permet de tracer la caractéristique du facteur de bruit en fonction du courant de polarisation

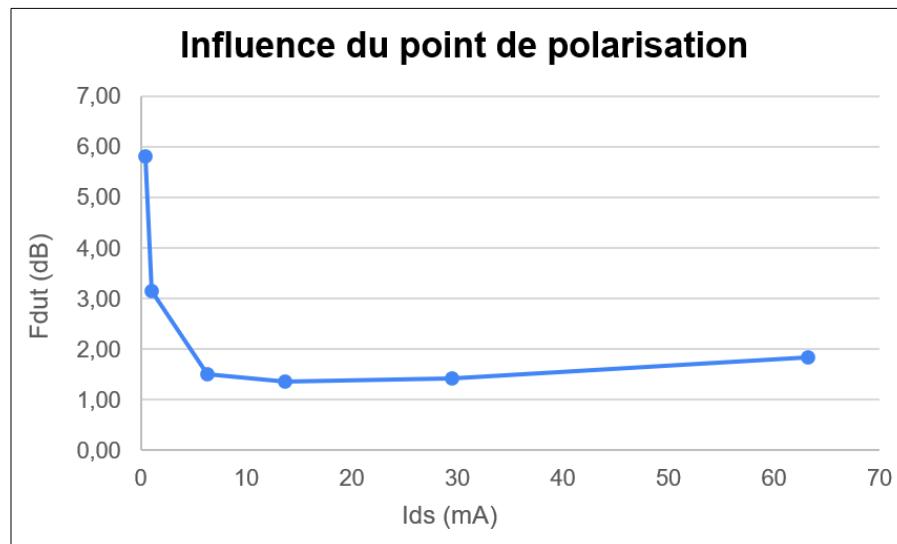


Figure 2: Caractéristique du facteur de bruit expérimentale

2.2.2 Discussion des résultats

- Pour des courants élevés ($I_{DS} > 20$ mA), S_{22} reste faible, le gain disponible G_a est maximal, et le facteur de bruit du transistor est minimal, autour de $F_{DUT} \approx 1.3\text{--}1.6$ (soit 1.4 à 1.8 dB).
- Le minimum de bruit est obtenu pour un courant compris entre 10 mA et 15 mA, ce qui correspond à la zone où S_{22} reste modéré et où G_a ne s'effondre pas.
- Lorsque I_{DS} devient faible ($I_{DS} < 2$ mA), le transistor n'est plus dans sa zone de fonctionnement optimale : S_{22} devient très élevé, le gain disponible chute et F_{DUT} augmente fortement (jusqu'à 6 dB).
- Les résultats sont cohérents avec les tendances présentes dans la datasheet : le facteur de bruit minimal n'est pas obtenu à gain maximal, mais pour un point de polarisation intermédiaire.

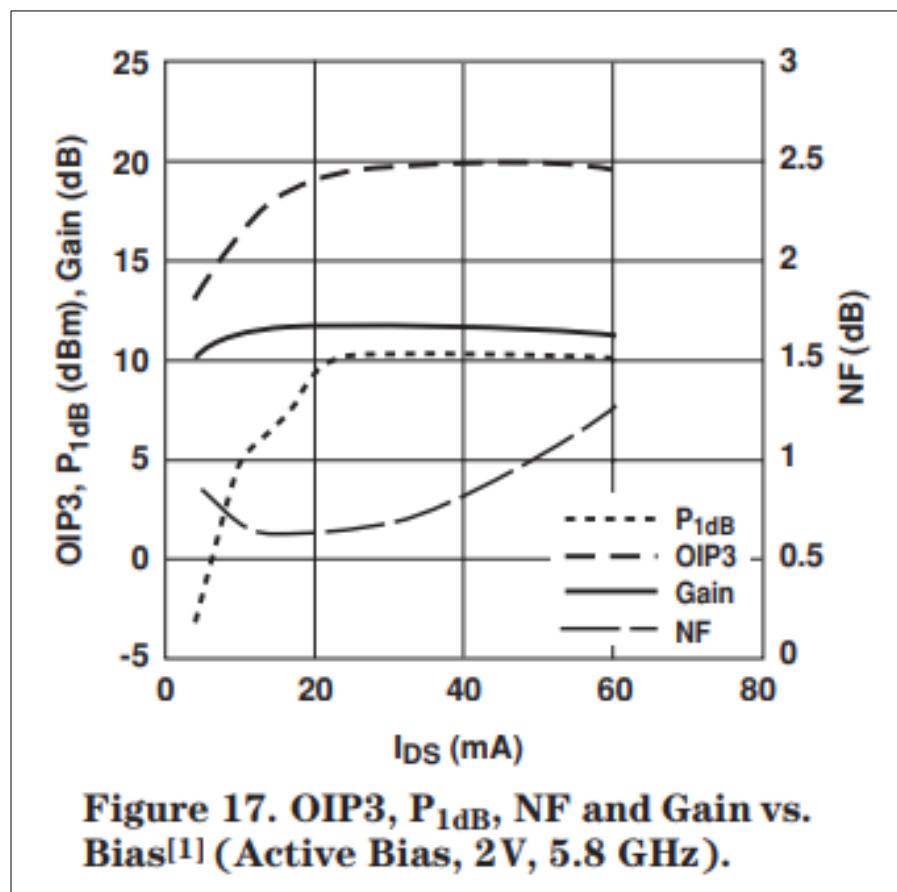


Figure 3: Caractéristique du facteur de bruit fournie par la datasheet du transistor

2.2.3 Comparaison avec la datasheet

Nous pouvons constater que les 2 caractéristiques (mesurées et fournies par la datasheet) présentent une allure très similaire en fonction du courant I_{DS} . Dans les 2 cas, le facteur de bruit est élevé pour de faibles courants, puis diminue fortement pour atteindre un minimum autour de 10 à 20 mA avant de remonter légèrement lorsque I_{DS} devient plus important.

Les valeurs mesurées sont cependant plus élevées que celles annoncées par le constructeur. Cet écart s'explique par plusieurs facteurs. La datasheet fournit le NF du transistor seul, mesuré dans des conditions idéales d'adaptation et sans les éléments extérieurs. Dans notre cas, la mesure inclut le transistor, les circuits de polarisation et d'adaptation. L'ensemble ajoute des pertes et du bruit, ce qui augmente la valeur mesurée du facteur de bruit. La présence de connectiques, de sections de ligne et des longueurs d'accès au transistor dans le boîtier utilisé pour le TP contribue également à la dégradation du bruit. Malgré ces écarts, nos courbes reproduisent bien la tendance constructeur et confirment qu'un point de polarisation intermédiaire (autour de 15 mA) permet d'obtenir le facteur de bruit minimal.

Remarque importante. Le minimum mesuré F_{DUT} ne correspond pas à F_{min} . Obtenir F_{min} nécessiterait de polariser le transistor et d'ajuster son impédance d'entrée et de sortie via un tuner afin d'atteindre les conditions optimales de bruit (Z_{opt}).

3 Annexes

3.1 Annexe A : Tableau des mesures - Influence de la polarisation sur le facteur de bruit

Ids (mA)	S22	Fm	PNS1Q (dB)	PNS1 (dB)	PNS1Q/PNS1	Pb chaud (dB)	Pb froid (dB)	Ylin	Gins	Ga	Ga (dB)	Gain ref (dB)	Ft	Fdut	Fdut dB
63.2	0.207	8.744701724	11.2	1.85	8.609937522	34.66	21.36	21.3796209	41.87762631	43.75237378	16.41	16.36	1.70	1.53	1.83
29.5	0.208	8.748494883	10.8	1.7	8.128305162	35.55	21.9	23.1739465	43.01589589	44.9610926	16.53	16.13	1.56	1.39	1.43
13.7	0.276	9.060167305	9.15	1.8	5.432503315	34.6	21.15	22.1309471	27.39712175	29.65621347	14.72	15.66	1.64	1.37	1.37
6.3	0.385	9.826538699	8.35	1.75	4.570881896	33.1	19.95	20.65380156	21.44038323	25.17141643	14.01	14.66	1.77	1.42	1.51
1.01	0.707	16.73494605	4.95	1.7	2.11348904	26.9	16.75	10.35142167	4.716975465	9.431102738	9.75	10.10	3.73	2.06	3.14
0.46	0.807	23.9993118	3.5	1.65	1.531087462	21.3	14.85	4.415704474	1.248148518	3.578910221	5.54	7.98	10.25	3.82	5.82

Figure 4: Tableau des mesures complet

IDS (mA)	S₂₂	F_m	PNS1Q (dB)	PNS1 (dB)	PNS1Q/PNS1	P_b^{chaud} (dB)	P_b^{froid} (dB)	Y_{lin}	G_{ins}	G_a	G_a (dB)	F_t	F_{DUT}	F_{DUT} (dB)
63.2	0.207	8.7447	11.2	1.85	8.6099	34.66	21.36	21.3796	41.8776	43.7524	16.41	1.70	1.53	1.83
29.5	0.208	8.7485	10.8	1.70	8.1283	35.55	21.90	23.1739	43.0159	44.9611	16.53	1.56	1.39	1.43
13.7	0.276	9.0602	9.15	1.80	5.4325	34.60	21.15	22.1309	27.3973	29.6562	14.72	1.64	1.37	1.37
6.3	0.385	9.8265	8.35	1.75	4.5709	33.10	19.95	20.6538	21.4404	25.1714	14.01	1.77	1.42	1.51
1.01	0.707	16.7349	4.95	1.70	2.1135	26.90	16.75	10.3514	4.7169	9.4310	9.75	3.73	2.06	3.14
0.46	0.807	23.9993	3.50	1.65	1.5311	21.30	14.85	4.4157	1.2481	3.5790	5.54	10.25	3.82	5.82

Table 1: Tableau des mesures complet retranscrit d'Excel